

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica

TESIS DE GRADO

" SIMULACION DE LOS FENOMENOS ELECTRICOS Y MECANICOS QUE  
AFECTAN EL NORMAL FUNCIONAMIENTO DE UN CENTRO DE COMPUTO."

Tesis previa a la obtención del título de  
Ingeniero en Electrónica y Control.

LUIS MANUEL ECHEVERRIA YANEZ

QUITO, NOVIEMBRE DE 1991

## Dedicatoria

A mis padres, a mis hermanos sin cuyo apoyo no habría podido salir adelante en mi carrera, y a la memoria de mi abuelo Luis A. Yáñez Tobar, quien por siempre, será mi guía.

### Agradecimiento

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos al Ing. Patricio Burbano, jefe de tesis por su acertada dirección y a mi primo Melio Sáenz Echeverría, jefe de la Unidad de Sistemas de Petroecuador cuya genial idea se ha hecho realidad con la presente tesis.

Certificado

Certifico que el presente trabajo ha sido hecho en su totalidad por el señor Luis Manuel Echeverría Yánez.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Burbano', with a horizontal line under the name.

Ing. Patricio Burbano.

## CONTENIDO

Capítulo 1: Generalidades.	Pags.
1.1 Introducción.....	2
1.2 Alcance y objetivos.....	4
Capítulo 2: Fenómenos eléctricos y mecánicos que afectan a un centro de cómputo.	
2.1 Características de protección contra cargas estáticas.....	7
2.2 Características de protección contra radiaciones.....	20
2.3 Características de protección contra vibraciones.....	36
2.4 Características de protección contra otros fenómenos.....	56
Capítulo 3: Simulación de fenómenos eléctricos y mecánicos.	
3.1 Modelación de fenómenos eléctricos, mecánicos y radiación.....	64
3.2 Planteamiento del problema y parámetros fundamentales.....	92
3.3 Modelación de los fenómenos eléctricos y mecánicos que afectan a un centro de cómputo.....	94
3.4 Desarrollo de los programas de simulación.....	96
Capítulo 4: Aplicaciones y conclusiones.	
4.1 Resultados de la simulación.....	129
4.2 Simulación para un sistema real.....	143
4.3 Conclusiones.....	153
Bibliografía.....	162

Apendice A: Listados de los programas usados.....	168
Apendice B: Manual de uso.	
Apendice C: Medición experimental de coeficientes de capacidad.....	192
Apendice D: Especificaciones de los equipos de computación.....	193

## CAPITULO 1 : GENERALIDADES

1.1 Introducción.

1.2 Alcance y Objetivo.

## 1.1 INTRODUCCION

El desarrollo de la tecnología en los sistemas digitales y las ventajas proporcionadas por éstos en el manejo y almacenamiento de la información a través de los sistemas de computación, precisa mantener a estos equipos en salas especialmente adecuadas para garantizar su normal funcionamiento y prevenir pérdidas y daños en la información que se esta procesando o se ha almacenado.

A medida que han ido evolucionando los sistemas de computación, gracias al crecimiento del nivel de integración, velocidad de procesamiento, capacidad de almacenamiento de información y decremento del tamaño de sus componentes, los circuitos digitales son cada vez más delicados y por ende, susceptibles a fallas y daños debido a factores externos al sistema de computación.

Factores externos como: electricidad estática, vibraciones, radiaciones, humedad, temperatura, tienen efectos negativos, para el mejor de los casos, y destructivos, para el peor, en sistemas de computación, muchos de los cuales son actualmente piezas fundamentales en el desarrollo, avance científico, técnico y económico actual, debido a que estos equipos están capacitados para procesar y almacenar grandes cantidades de información. Es obvio que estas y otras razones obligan a mantener los sistemas de computación funcionando precisa e ininterrumpidamente.

Por medio de un programa de simulación se puede observar y evaluar la forma como resultan afectados los equipos de computación en el caso, que un fenómeno nocivo se presentara; naturalmente se puede diseñar controles y tomar precauciones para proteger de mejor manera los equipos de un centro de cómputo. El modelo computacional evitará que dicho centro enfrente desprotegido el apareamiento de estos fenómenos nocivos; así como, permitirá experimentar sobre modelos

matemáticos y no directamente sobre equipos en funcionamiento, que resulta mucho más difícil y costoso.

Este trabajo de tesis es parte de un estudio global sobre simulación de la seguridad en un centro de cómputo. Los fenómenos en los que ésta tesis profundiza son tres: electricidad estática, vibración y radiaciones, sobre los equipos de un centro de cómputo, dejando para otros trabajos la influencia de variables como temperatura, humedad, etc.

Con el fin de conocer la forma como actúan los tres fenómenos mencionados sobre los equipos de un centro de cómputo es necesario conocer un modelo aproximado del comportamiento de dichos equipos frente a estos fenómenos. Una vez obtenido el modelo se realizará la simulación para lo cual se contará con la ayuda que puede prestar un programa en lenguaje de simulación DYNAMO.

Para elaborar un modelo adecuado se necesita conocer como física y matemáticamente actúan los fenómenos mencionados y su influencia sobre los equipos. La modelación naturalmente tendrá su base en las relaciones matemáticas que reflejan el funcionamiento de los diferentes componentes del sistema, y además la simulación explotará las ventajas que ofrecen los lenguajes de simulación.

En el segundo capítulo se realiza un estudio de los mecanismos como, los tres fenómenos indicados, afectan a los componentes de un equipo, así como los componentes más sensibles en un equipo a dichos fenómenos, tema de este estudio. Además para algunos de éstos se citará formas de medición, prevención y control.

El tercer capítulo está formado de dos partes: en la primera se desarrolla el modelo matemático y la segunda parte está dedicada al desarrollo del programa de simulación usando los modelos matemáticos y el lenguaje de simulación escogido.

El cuarto capítulo consta de tres partes: en la primera se describe los resultados y las condiciones bajo las cuales se realizará las pruebas, la segunda se dedica a la presentación de los resultados de las mismas y la tercera son las conclusiones a que se llega luego del estudio de las pruebas.

## 1.2 ALCANCE Y OBJETIVO

Uno de los dos principales objetivos de la presente tesis es realizar un programa de computación aprovechando las posibilidades que presenta el DYNAMO para la simulación de sistemas dinámicos, y el segundo objetivo es demostrar, por medio de un estudio y posteriormente con los resultados de la simulación, la nociva influencia de la descarga electrostática, golpe, vibración y radiación, sobre los equipos de computación de un centro de cómputo y aún sobre otros tipos de equipos electrónicos.

La presente tesis pretende aplicar una de las herramientas más importantes con las que se cuenta actualmente para el análisis de sistemas dinámicos: el lenguaje de simulación. El DYNAMO (DYNAmic MOdelling) escogido para la presente tesis, es un lenguaje especializado que permite trabajar a partir de los diagramas de bloques o variables de estado, evitando desarrollar analíticamente la respuesta, de un sistema, para posteriormente relizar la evaluación o, en su defecto desarrollar un programa en uno de los lenguajes de multipropósito como Basic, Fortran, Pascal, etc, para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales asociadas a un modelo o un sistema de control, a fin de obtener información del comportamiento del sistema bajo estudio.

El alcance de esta tesis va mas allá de desarrollar modelos y su simulación. Trata de demostrar las ventajas de los lenguajes de simulación y como resultado de esto

estimular su uso en trabajos que impliquen simulación o análisis de cualquier sistema físico, sea este eléctrico, mecánico, químico o de cualquier tipo de rama técnica cuyos principios puedan ser traducidos a ecuaciones diferenciales, como se ilustrará en el desarrollo de la presente tesis en la que se analizan fenómenos de diferentes tipos.

Finalmente cabe señalar que el lenguaje de simulación también, se lo puede aplicar para analizar sistemas económicos, biológicos, sociales y una variedad de sistemas no técnicos, para lo cual se usa la Dinámica de Sistemas.

CAPITULO 2 : FENOMENOS ELECTRICOS Y MECANICOS QUE AFECTAN A  
UN CENTRO DE COMPUTO.

- 2.1 Características de protección contra cargas estáticas
- 2.2 Características de protección contra radiaciones
- 2.3 Características de protección contra vibraciones
- 2.4 Características de protección contra otros fenómenos

## 2.1 CARACTERISTICAS DE PROTECCION CONTRA CARGAS ESTATICAS

La descarga electrostática puede causar fallas directas, indirectas o latentes en aparatos o elementos microelectrónicos. Con el crecimiento del nivel de integración y decremento del tamaño, que permiten los sistemas de circuitos VLSI, éstos son cada vez más susceptibles a fallas del tipo ESD (Electrostatic Discharge), lo que obliga a usar avanzadas formas de protección en las entradas de los circuitos integrados de estos sistemas.

Nuevos problemas relacionados con la ESD han llegado a ser evidentes en estas microestructuras, tales como el latch-up en los aparatos CMOS, pero avances en la tecnología del silicón han venido proporcionar circuitos más resistentes al latch-up.

Como resultado del reemplazo de los sistemas analógicos por los digitales en los nuevos diseños, la falla indirecta actualmente es la causante del mayor número de fallas en los sistemas.

El fenómeno de la ESD en un sistema electrónico, es muy complejo por algunas razones, entre las que se puede citar:

1. Existe dificultad para modelar las características eléctricas de la fuente de carga, sumidero, y el camino para la primera y tal vez la segunda descarga.
2. Los cálculos de las corrientes transitorias, potenciales transitorios y la energía disipada o radiada debido a la descarga dependen del modelo usado.
3. Los transitorios del sistema y el medio ambiente electromagnético son responsables de la

interferencia electromagnética (EMI) conducida y radiada.

4. La medición de los parámetros del sistema, requeridos para modelar la descarga y de los transitorios del ESD, es difícil.
5. Pruebas normalizadas, tanto para componentes como para equipos están aún bajo revisión.

Algunos factores afectan la susceptibilidad de un equipo al ESD. Ellos incluyen pórticos de potencia de entrada y salida, uso o no de cables acorazados, técnicas de puesta a tierra, características de la fuente de ESD, y la naturaleza del encapsulamiento: dieléctrica o conductiva (continua o discontinua, a tierra o flotante).

La sensibilidad de los circuitos integrados de metal-óxido (MOS) a la descarga electrostática, ha asumido el rol más crítico en años recientes.

### 2.1.1 Fuentes de descarga electrostática (ESD)

El contacto o la separación entre dos diferentes materiales provoca la generación de carga de polaridad opuesta en ambos. Esta se define como carga por triboelectrificación. Un cuerpo descargado puede adquirir carga en presencia de un campo electromagnético externo, ésto se conoce como carga por inducción.

Hay cuatro mecanismos principales por los cuales la ESD puede afectar a un sistema. Estos son el contacto directo de un componente sensitivo a la ESD, contacto indirecto de un componente sensitivo a la ESD, ruido conducido o radiado, e inducción de carga. El cuerpo humano o un cuerpo conductor aislado son usualmente especificados como fuentes de carga.

## 2.1.2 Mecanismos de la falla por ESD

Cuando sobre un integrado se presenta una falla del tipo ESD, el mecanismo de falla es normalmente electrotermal. La potencia que causa la falla es eléctrica, pero la naturaleza de ésta es termal: la disipación de la energía eléctrica causa un punto de calor localizado.

En 1968 Donald C. Wunsch y Richard R. Bell de BDM Corp. Albuquerque, N.M [3], publicaron una investigación delineando los mecanismos básicos de las fallas en semiconductores por sobretensión eléctrica, causado por algunas fuentes de transitorios que incluye la ESD, en las juntas de los semiconductores. Este modelo estuvo basado en el análisis de las propiedades termales provocadas por altas tensiones sobre la junta, constituyéndose más que un detallado modelo físico, un modelo de ingeniería, basado en principios físicos como: la potencia requerida para hacer fallar a la junta esta relacionada con el ancho del pulso transitorio producido. Tres diferentes rangos de ancho de pulso caracterizan esta relación, como se observa en la figura 2.1. Transitorios extremadamente pequeños, típicamente menores que 100 ns. impiden calores en el área, cerca a la junta donde el calor está siendo disipado. En este caso el calentamiento es adiabático y la potencia requerida para hacer que la junta falle; varía inversamente con la amplitud del pulso. Para transientes más largos, de milisegundo o más, se alcanza un flujo de calor en estado estable y la potencia para que la junta falle es constante e independiente del ancho del pulso. Son anchos de pulso intermedios, los que intervienen más al producirse un sobrevolteje. Cuando Wunsch y Bell resolvieron la ecuación del flujo de calor unidimensional en el rango intermedio, lograron determinar que la potencia productora de la falla varía inversamente con la raíz cuadrada del ancho del pulso. Este modelo ha resultado extremadamente efectivo en el análisis de la tensión

eléctrica y es aún ampliamente usado pese a su simplicidad.

### Flujo de corriente filamentaria.

Cuando la juntura falla, un camino de baja resistencia se forma en paralelo con ésta. Aunque el camino no es realmente un cortocircuito, ésta suposición es una buena aproximación. La resistencia en paralelo es menor a 10 ohmios, en una juntura que ha sido fuertemente dañada y en una de medio daño, la resistencia en paralelo puede ser tan alta como 10 megaohms.

La formación de caminos de muy baja resistencia es la culminación de la respuesta electrotermal de la juntura a la tensión producida por la ESD, la misma que típicamente ocurre en tres etapas. Comienza cuando la juntura

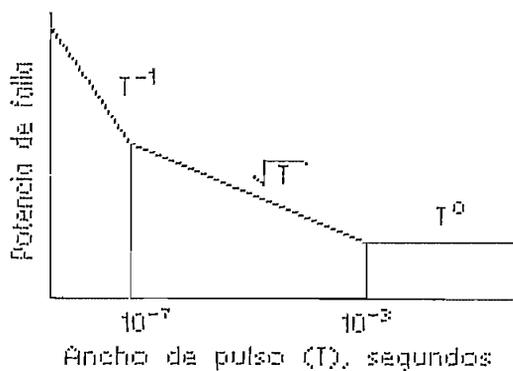


Figura 2.1 Potencia de falla y característica de la descarga.

experimenta avalancha reversa, o se, avería, como resultado de altos campos. Cuando el electrón acelerado por estos campos golpea un átomo, éste libera más electrones, los cuales continúan con esta secuencia. Un dispositivo puede operar establemente en avalancha, si se limita la corriente. De otro modo, la fuerte corriente que puede fluir calienta el semiconductor, pasando el punto donde su coeficiente de resistividad a la temperatura llega a ser negativo, cayendo cada vez más, en una condición de fuga,

como se observa en la figura 2.2. El dispositivo entra entonces a la segunda fase, ésta segunda ruptura caracterizada por corrientes inestables que aumentan desde la primera avalancha. La inestabilidad conduce al flujo de una corriente filamentaria, esto constituye la tercera fase. Finalmente el semiconductor se "funde", cambia el estado del semiconductor a lo largo de la corriente filamentaria, formando un camino en paralelo de baja impedancia a lo largo de la juntura.

Adicionalmente a este modo "termal" de la segunda avalancha, hay un modo de "corriente" que depende de la dinámica de la avalancha en el silicón y parece ser el resultado de pulsos muy pequeños, menores a 100 nanosegundos de duración, similares a los producidos por la ESD.

Para la falla no se requiere juntura, aunque es usual localizar aquí las fallas debido a que campos fuertes en las juntas causan disipación de potencia que se concentra en ésta. Cuando la disipación es a lo largo de regiones amplias, se requieren grandes niveles de potencia, para elevar la temperatura local a la de falla.

#### Fallas en la metalización.

Muchas de las investigaciones sobre fallas causadas por la tensión, se concentran en los materiales semiconductores, pero la fina capa de metalización sobre éstos, es también susceptible a falla. La quemadura de la metalización frecuentemente acompaña a la falla en la juntura. La juntura generalmente se acaba primero, permitiendo que se abra un camino para que altas corrientes circulen por la metalización, calienten a ésta y la fundan. Las fallas en la metalización resultan en un circuito abierto, de manera que el corto en la juntura puede conducir a una falla de circuito abierto.

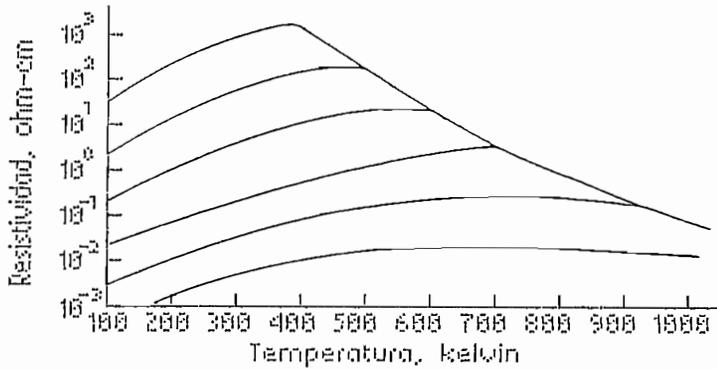


Figura 2.2 Características resistividad - temperatura para un semiconductor.

Fallas en la metalización pueden ocurrir independientemente a fallas en la juntura. La tira de metalización de pequeña área seccional, que es conectada a grandes juntas probablemente fallará antes que la juntura misma. Este es el caso en dispositivos CMOS, cuando la metalización esta conectada a una red de protección de entrada. Este circuito conformado por diodos y resistencias colocado a la entrada del circuito integrado, es diseñado para manejar los transitorios provocados por el ESD sujetando la entrada a niveles seguros.

La física referente a la falla de la metalización, no es tan complicada como la del semiconductor; el coeficiente de resistividad a la temperatura es positivo, y no hay inestabilidad de corriente. La falla ocurre; si la disipación de potencia eleva la temperatura a su punto de fusión. La dinámica del flujo de calor, es similar a la de los semiconductores y la curva que relaciona potencia con ancho de pulso para que la metalización se queme, es la misma, para las fallas de los semiconductores. Sin embargo, los puntos de corte entre las tres regiones difieren considerablemente porque, la metalización en muchos de los casos es termalmente aislada, por una capa de óxido. La

región de  $l/T$  en el modelo de Wunsch caracteriza muchas fallas en la metalización.

### Fallas en componentes pasivos

Los dispositivos pasivos, como inductancias, resistencias y condensadores, son también susceptibles.

Las inductancias; son generalmente arrollamientos de alambre muy fino con valores de corriente de fusión menores a 2 amperios. Pero por la naturaleza del inductor, éste tiende a resistir rápidos cambios en la corriente, de manera, que las inductancias son susceptibles solamente a transitorios de larga duración.

Los condensadores están sujetos a perforación en el dieléctrico, fallas bastante similares a la de los dispositivos CMOS, una vez que el voltaje de ruptura se ha excedido. Cierta tipo de condensadores electrolíticos pueden recuperarse a si mismos después del daño, reformando su dieléctrico, pero los condensadores de cerámica fallan abrupta y permanentemente.

Con la disminución del tamaño de los capacitores a fin de ubicar mayor cantidad de éstos en la misma área, el grosor de los dieléctricos disminuyen y con éste disminuye su voltaje de ruptura, lo que dá como resultado elementos menos resistentes a altas tensiones eléctricas.

En resistencias, la susceptibilidad varía sobre un amplio rango de potencias de falla, de 100 watios a 1000 kilowatios para transitorios de un microsegundo. Resistores de alambre bobinado y algunos de composición de carbón tienen umbrales de falla altos, ubicados al final de este rango. En el límite inferior se ubican, resistores de cintas delgadas que pueden tener umbrales de falla similares a las de los semiconductores. Valores intermedios

poseen los resistores de carbón y, de película de carbón y metal.

La relación entre potencia de falla y ancho de pulso para los resistores, es similar a la de los semiconductores, pero el punto de corte entre las tres regiones del modelo, se traslada en dirección de grandes anchos de pulsos.

### Fallas menores

No todos los daños provenientes de la tensión eléctrica son catastróficos. Si la ESD sobre el dispositivo semiconductor es ligera, el daño puede ser tan sutil que no interfiera en la operación del circuito, previniendo de esta manera su detección. Tal daño por sí solo, es insignificante, a no ser que la confiabilidad del equipo se haya reducido. Ligera tensión durante las pruebas realizadas en un equipo, puede afectar la confiabilidad del mismo, debido a la fusión parcial de la metalización en uno o varios de sus circuitos integrados, como resultado de que la corriente de operación normal fluirá por un conductor más angosto, produciendo un calentamiento anormal que posteriormente podría provocar una erosión, que conduzca a crear un punto de falla.

Experimentalmente se ha demostrado, que pruebas de resistencia, a la tensión, pueden afectar la confiabilidad de los aparatos por formación de altas resistencias en paralelo a la junta. En este caso, algunos especialistas consideran que el 100 por ciento de las pruebas, no son convenientes y deberían ser reservadas para un pequeño grupo de aparatos de muestra, por cada lote.

La tabla 2.1 nos muestra, en diferentes componentes, la potencia que debe tener un transitorio de 1  $\mu$ s para producir el inicio de falla [3].

Componente	Mínimo valor (Wattios)	Máximo valor (Wattios)
<u>Elementos discretos</u>		
Microwave mixer diode	0.2	20
Diodo de proposito general	10	5000
Diodo de potencia	300	50000
Diodo de referencia	500	50000
Diodo zener	500	100000
Transistor de baja potencia	3	1000
Transistor de potencia	100	10000

### Circuitos integrados

TTL	3	100
ECL	10	200
CMOS	10	1000
IC lineales	30	1000

Tabla 2.1: Potencia a la cual un transitorio de 1  $\mu$ s producirá el comienzo de falla en el dispositivo.

### 2.1.3 Requerimientos de protección [20]

Para pruebas que satisfagan las especificaciones de protección, sobre todo el equipo, se han recomendado voltajes entre 7.5 y 30 kV para sistemas electrónicos, dependiendo de factores como: humedad y aplicación.

Pruebas estandarizadas se encuentran aún en período de evolución. DOD-STD-1686 y DOD-HDBK-263, especifican un voltaje de prueba superior a los 15 kV y una capacitancia y resistencia de descarga de 100 pF y 1500 ohmios, respectivamente. MIL-STD-883 usa un voltaje de prueba de 2 kV y los mismos valores de resistencia y capacitancia.

Estos métodos de prueba y procedimientos se aplican primariamente en aparatos electrónicos. La publicación 801-2 de la IEC especifica voltajes de prueba de 2 kV a 16.5 kV con una resistencia de 150 ohmios y una capacitancia de 150 pF.

La prueba para aparatos electrónicos consiste en dar descargas directas al equipo a probar y a los objetos vecinos de éste, sin embargo el test que se aplica a un equipo en prueba, depende de la tecnología de los componentes del mismo, aplicación del equipo, medio ambiente operativo y especificaciones de confiabilidad.

Si la descarga se realiza directamente sobre uno de los componentes que forman el equipo, el voltaje necesario, para que éste se destruya es mucho más pequeño.

#### 2.1.4 Protección de los equipos

Con la evolución de los integrados de gran densidad y alta velocidad, los requerimientos para su protección, contra la ESD, es más estricta. En general; un sistema electrónico, consiste en un circuito modular en el interior de una cubierta. Esta cubierta puede ser dieléctrica o conductora, con una variedad de aperturas al exterior, a tierra o flotante y cables de entrada o salida, que están usualmente presentes, junto con elementos de interface al ser humano, tales como interruptores o teclados.

Idealmente un sistema puede ser protegido, usando como cubierta una jaula de Faraday, cuyo campo sería cero en el interior de la misma, sin embargo la efectividad de ésta, dependerá de su conductividad.

El material del cual está cubierto el piso, podría contribuir a reforzar o crear cargas eléctricas estáticas, como resultado del movimiento de personas, carritos, y

muebles sobre éste.

Telas, paños o alfombras de fibra sintética, incluyendo ropas o bolsas de este material, pueden acumular gran cantidad de electricidad estática en medio ambiente seco. Por esta razón, se han estudiado y puesto en práctica métodos antiestáticos, para usar en paños y fibras sintéticas con el fin de evitar, riesgos electrostáticos. Por consiguiente dos materiales básicos, el aditivo químico antiestático y la fibra eléctricamente conductiva (ECF) han sido desarrolladas para modificar la conductividad eléctrica de las fibras sintéticas.

Este último material, ECF, puede producir un fuerte campo electrostático no uniforme al colocarlo cerca de materiales cargados, y elevar débilmente las descargas alrededor de él. Como resultado, la carga electrostática sobre el material en el cual se teje el ECF, es neutralizada por descargas alrededor del ECF. Basado en resultados experimentales se han desarrollado y son

ECF	Resistencia aparente (ohm/cm)	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Voltaje (kV)
Fibra revestida de carbón	$10^5 - 10^9$	15 - 20	-2.3
de plata	$10^3 - 10^6$	30 - 50	-2.3
de cobre	$10^3 - 10^0$	15 - 20	-2.0

Tabla 2.2 Propiedades de una sola fibra de ECF tejida en un paño

ampliamente usados materiales antiestáticos, tejidos parcialmente con ECF (paños ECF) con el fin de prevenir riesgos. La tabla 2.2 indica algunos tipos de estos materiales y sus parámetros fundamentales.

Otras formas [8] de minimizar el efecto de la carga estática son:

- Mantener la humedad relativa de la habitación, dentro de los rangos operativos de la máquina, escogiendo un control que mantenga la humedad entre 35% y 60%.
- Proveer una buena tierra al piso falso metálico, y a los paneles metálicos que lo conforman.
- Asegurar que la máxima resistencia del sistema de piso sea de  $2 \times 10^{10}$  ohms, medidos entre la superficie del piso y la edificación (o la referencia de tierra). Un buen sistema de piso, con una pequeña resistencia reducirá el riesgo que presentan las cargas estáticas. Por seguridad, el cobertor del piso y el sistema de piso falso deben dar una resistencia menor a 150 kilohms, al medir ésta, entre dos puntos cualquiera del piso distantes 1m.

Como se indicó el mobiliario de un centro de cómputo puede ser una fuente potencial de carga estática; considerando esta circunstancia, es necesario cubrir el mismo con cobertores hechos de material antiestático. Se debe prevenir, colocar en la base del mobiliario, pies de caucho u otro tipo de material aislante. Si se usan muebles con algún tipo de ruedas o rodamientos, éstos deben ser lubricados con grafito o algún otro tipo de grasa conductiva. Todo rodamiento o rueda debe ser de material conductivo.

La resistencia del mobiliario que toque el piso (rodamientos o pies) será menor que 1000 megaohms, desde una pieza metálica, en el armazón del mobiliario a la superficie metálica, en el lugar que el mobiliario se vaya a colocar.

El problema que acarrea usar dispositivos sensibles a las cargas estáticas, ha obligado que los chips tengan internamente un circuito de protección. Las compuertas de los transistores MOS son especialmente sensibles, a la tensión eléctrica. En el transistor MOS, lo máximo que la

pequeña capa de óxido puede resistir, es conocido como voltaje de ruptura. Más allá de estos límites, la corriente crea puntos de falla, a través del óxido, formando un camino permanente, desde la compuerta al semiconductor base. Como este tipo de falla ocurre rápidamente, las compuertas MOS deben ser cuidadosamente manejadas si carecen de red protectora.

Muchos circuitos digitales MOS, incorporan en el chip circuitos de protección. En una típica red de entrada para un circuito digital CMOS, diodos en paralelo previenen de transitorios, como se observa en la figura 2.3. Estas redes pueden quitar eficiencia a los circuitos, pero es necesario buscar un compromiso entre: protección, densidad de integración y velocidad del integrado. Los diodos por su papel de sujetar la entrada deben ser grandes, y es adecuado un valor de resistencia grande. Sin embargo estos diodos toman una gran cantidad de espacio, y la constante RC que introducen limita la velocidad.

Es más dificultoso crear redes de protección para dispositivos NMOS. Como pequeñas difusiones son disponibles en el proceso de los NMOS, más que en los CMOS, no se pueden usar muchos diodos. En su lugar, se ponen en paralelo, a la entrada, transistores MOS, aunque los diodos son más efectivos. Esto se añade a que la concentración de componentes en un IC NMOS, es más alta que en un CMOS, presentándose dificultades de colocación para las redes de protección.

En la figura 2.3 el diodo D1, desvía los transitorios positivos a la línea Vss, los diodos D2 y D3, desvían los transitorios positivos a la línea Vdd. En la misma figura se indican voltajes típicos de ruptura para los diodos indicados, la resistencia  $R_s$ , de 15 kilohms nominales limita transientes de corriente.

La tabla 2.3 [31] nos da idea de los voltajes que pueden ser generados en un ambiente de humedad relativa del 15 al 30%, para diferentes condiciones de una persona y sobre circuitos integrados.

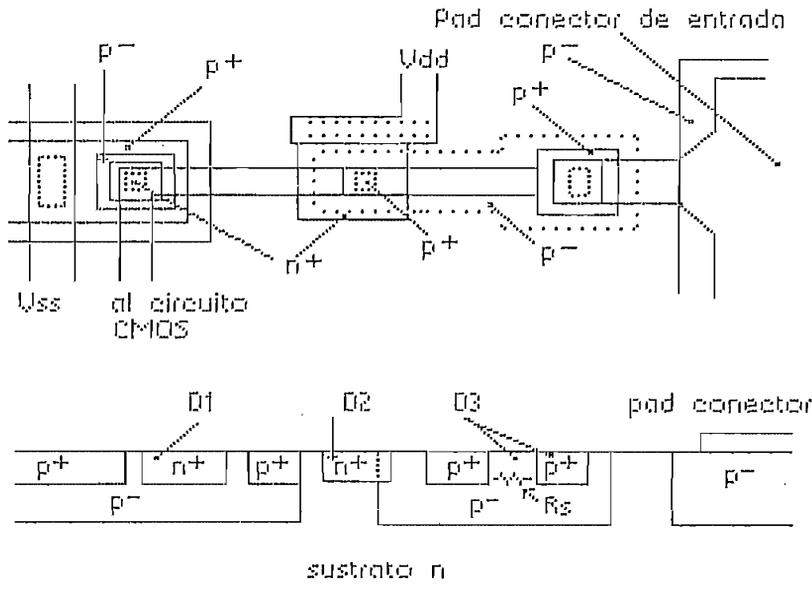
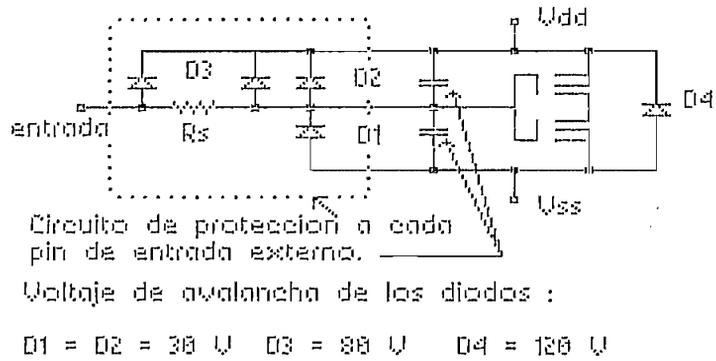


Figura 2.3 Los CMOS digitales incorporan redes protectoras de resistencias, con objeto de limitar las corrientes y diodos en paralelo para evitar los transitorios.

## 2.2 CARACTERISTICAS DE PROTECCION CONTRA RADIACIONES.

Un equipo electrónico puede estar sujeto a diferentes tipos de radiaciones, de las cuales se citan dos: radiaciones electromagnéticas y radiaciones de partículas.

### 2.2.1 Interferencia electromagnética (EMI)

Las radiaciones electromagnéticas, al igual que los rayos o la descarga eléctrica, producen en el equipo, y principalmente en sus componentes, altas tensiones eléctricas. Son muchas las fuentes que pueden causar ondas

Condición	Lectura	
	más común (V)	más alta (V)
Persona caminando a lo largo de una alfombra.	12000	39000
Persona caminando a lo largo de pisos de vinil.	4000	13000
Persona trabajando sobre un banco	5000	3000
DIPs de 16 pines en caja plástica	3500	12000
DIPs de 16 pines en embalaje plástico de tubo.	5000	3000

Tabla 2.3: Voltajes generados para un ambiente de humedad relativa del 15 al 30%.

electromagnéticas a diferentes frecuencias y amplitudes. Las señales radiadas por un circuito pueden dañar el equipo electrónico cercano o al mismo circuito que las irradia.

Los pulsos electromagnéticos radiados por una explosión nuclear pueden alcanzar fuertes campos con picos de 50 kV/m a frecuencias de 100 kHz a 100 MHz. El efecto de estas ondas sobre los circuitos es considerablemente pequeño, debido a que los pulsos interactúan con los dispositivos. Los transitorios que se producen, realmente

varían desde pocos miliamperios a décimas ,o quizá cientos de amperios.

Cuando un relámpago cae en la vecindad de un circuito, la fuerza del campo puede ser mucho menor que aquella generada por los pulsos electromagnéticos de origen nuclear; pero estos últimos son mucho más amplios. Los transitorios que el relámpago produce también son diferentes, debido a que éstos interactúan en forma distinta que los pulsos electromagnéticos.

Micro ondas de alta potencia, inducirán a pérdida y/o distorsión (upset) de la información en un sistema cuya operación depende de señales eléctricas. A flujos de alta energía, este tipo de ondas quemarían componentes electrónicos sensibles en sistemas electrónicos. Los componentes que corren mayor riesgo son: diodos receptores en radares y circuitos de telecomunicaciones, además de chips lógicos MOS de baja potencia. A flujos bajos de energía, los circuitos electrónicos pueden adquirir señales espúreas que bloquearían o debilitarían temporalmente al equipo electrónico.

La forma como físicamente afecta a los componentes activos y pasivos de un sistema electrónico, este tipo de ondas, es similar a la explicada en el punto 2.1 para la descarga eléctrica.

Cabe adicionalmente notar que un suceso ESD es una fuente de interferencia electromagnética (EMI), conducida o radiada.

La EMI conducida, se produce cuando la fuente ESD, está físicamente conectada a un receptor y será acoplada por diferentes partes de un sistema, a través de impedancias comunes.

La EMI radiada ocurre, cuando la descarga se ha producido en la vecindad del sistema a proteger. La energía se acopla al sistema capacitivamente, por intermedio del campo E, o inductivamente a través del campo H, ésta generalmente no causa daño directo en los dispositivos electrónicos, de ahí que el modo de falla más común es el indirecto. Si los receptores de EMI, están próximos a la fuente, el campo es cercano o inducido y está determinado por las características de la fuente. Fuentes de alta corriente y bajo voltaje, presentan campos cercanos predominantemente magnéticos, y las mismas de alto voltaje y baja corriente, campos predominantemente eléctricos. Si el receptor está lejos de la fuente ( si  $\lambda$  es la longitud de onda a una frecuencia específica, en el espectro de frecuencia de la descarga, se considera que la fuente está cercana para distancias menores de  $\lambda/2$  y lejana para distancias mayores de  $\lambda/2$  ), las propiedades del campo dependen del medio, sin embargo las ondas de EMI radiadas son consideradas como un problema de campo cercano.

La habilidad de un equipo para operar en un medio ambiente dado, con otros equipos, sin causar intolerables niveles de EMI, o para operar normalmente en un ambiente con EMI se conoce como Compatibilidad electromagnética.

Las instalaciones de procesamiento de datos pueden ser planificadas para operar en áreas que tengan un alto campo electromagnético ambiental; esto sucede cerca de fuentes de interferencia de radio frecuencia (RF) tales como: estaciones de radio, televisión y antenas de transmisión de radar, además de lugares cercanos a equipos de tratamiento médico, como unidades electroquirúrgicas. Otros medios o equipos que generarían un intolerable medio de EMI o contribuirían a reforzar significativamente un campo ya existente son: radio trancivers (manuales, móviles o estacionarios), luces fluorescentes, sistemas de calentamiento por inducción, transformadores, grandes

bobinas, motores de AC o DC, equipos de suelda por arco o por RF, grandes conductores de corriente AC, transmisores comerciales (commercial broadcasting transmitters) y algunos tipos de equipos de computación.

Estandar para la operación de un equipo en un medio electromagnético.

Con el fin de clasificar el ambiente electromagnético, que se espera encontrar, para un lugar y banda de frecuencia específicos, es necesario que la fuerza del campo, producida por las fuentes potenciales de radiación, sea identificada. Idealmente, la fuerza del campo puede ser determinada de distintas maneras como:

- Medición experimental de la fuerza del campo en el lugar que está ocupando el equipo para bandas de frecuencia indicadas.
- Mediciones experimentales de la fuerza del campo en un lugar de características electromagnéticas similares.
- Cálculos que podrían predecir aproximadamente la fuerza del campo para una banda de frecuencias indicada, basados en: potencia radiada y frecuencia de una fuente electromagnética conocida, patrón de radiación de la fuerza electromagnética, si es el caso, y, distancia y grado de acorazamiento, entre la fuente de radiación y el lugar del equipo.

En la práctica sin embargo, la fuerza del campo electromagnético no es fácilmente medible, si no se tiene equipo sofisticado, calculable por métodos sencillos, debido a que la proximidad de otros equipos podrían distorsionar y/o reflejar las ondas electromagnéticas. Por esto la tabla 2.4 [16] proporciona una guía de intensidades de campos aproximadas para algunas fuentes.

## Clasificación de los campos electromagnéticos.

El medio ambiente electromagnético es clasificado por bandas de frecuencia y la severidad de la fuerza del campo dentro de las bandas. Esto permite al usuario más precisión para describir el ambiente como; la fuerza del campo en un lugar particular, donde se ubica el equipo, pudiendo variar con la frecuencia. La tabla 2.5 [16] lista las bandas de frecuencia específicas y el rango de fuerza del campo.

El rango 1, define ambientes de bajo nivel de radiación electromagnética, por ejemplo niveles típicos en estaciones locales de radio o televisión, en sitios más allá de 1600 km (1 milla), y niveles típicos de transceivers de baja potencia.

Aparatos	Frecuencias	Intensidad de campo (V/m)	
		1600 km	300 km
Comunicación, ayudas de navegación, calentamiento por inducción ultrasonica	150 - 540 kHz	0.8	3.5
Transmisores de radio AM.	0.540 - 1.6 MHz	2	10
High-Frecuency amateur, radio paging, land mobile	1.6 - 54 MHz	0.035	0.2
Radio transportado por tierra amateur o de negocio (policia, bomberos, etc), airport glide slope	216 - 470 MHz	0.035	0.2
VHF Tv, FM	54 - 216 MHz	2	10
P-band Radar	216 - 470 MHz	70	300
UHF Tv	470 - 890 MHz	9	40
Lazos de relés en navegación.	0.890 - 2.3 GHz	0.06	0.25
Varios radares.	0.890 - 7 GHz	20-100	70-400
X-band radar	0.890 - 7 GHz	5-50	25-350

Tabla 2.4 Intensidades de campos típicas

El rango 2, define ambientes de radiación

electromagnética moderada como por ejemplo campos producidos por transceivers portátiles estan relativamente cerca del equipo, no tan cerca de un metro.

El rango 3, define ambientes de radiación electromagnética severa, por ejemplo, niveles típicos dados por transceivers de alta potencia.

El rango 4, define equipo especial para elevadas condiciones de radiación.

Usando la clasificación dada, una especificación de equipo típica establecería la(s) clase(s) y rango(s) por medio de la susceptibilidad del equipo, por ejemplo:

Condición de operación normal: clase B2  
 Influencia operativa : < 0.02%

Clase	Banda de frecuencia (MHz)	Nivel de severidad*			
		1	2	3	4
A	20 - 50	<3	<10	<30	esp
B	50 - 300	<3	<10	<30	esp
C	300 - 1000	<3	<10	<30	esp
D	Especial	<3	<10	<30	esp

\*Máxima fuerza del campo en la banda de frecuencia, en V/m  
 esp = especial

Tabla 2.5 Clasificación de los equipos para diferentes niveles de severidad.

Adicionalmente a lo expresado, el campo electromagnético puede causar deflecciones impropias en los displays de video, especialmente en los de color.

## Protección contra campos electromagnéticos.

Si los equipos de un centro de cómputo no tienen compatibilidad electromagnética con algún tipo de equipo generador de EMI externo o interno a éste, es recomendable tenerlo alejado del mismo. Simples gravillas de mallas de alambre de aluminio es todo lo que ha sido indicado para resolver un problema de interferencia de radar comercial, y esto solamente en las ventanas. Las protecciones que muchos chips incluyen en su interior, y que fueron mencionados en el punto 2.1 también podrían servir para evitar daños debido a la tensión eléctrica causada por las ondas electromagnéticas.

### 2.2.2 Radiaciones ionizantes

La tecnología de los semiconductores de metal óxido de efecto de campo, (MOSFET) tiene muchas ventajas sobre la tecnología de juntura bipolar (BJT). En años recientes, el desarrollo de sofisticados sistemas espaciales y militares, satélites, etc han estimulado una activa investigación para encontrar circuitos lógicos fuertes a las radiaciones.

Las radiaciones ionizantes que afectan un equipo electrónico son: continuas o discontinuas. Entre las radiaciones ionizantes podemos citar: rayos gamma, X, cósmicos, etc. Contaminación radioactiva influirá en equipos operando cerca de reactores nucleares, bombas de cobalto, aceleradores, equipos hospitalarios de rayos X o equipo electrónico operando en el espacio.

### Bipolar vs. CMOS

La inherente gran resistencia a las radiaciones de los dispositivos bipolares sobre los CMOS, son el resultado de diferencias básicas en las estructuras de éstos dispositivos.

Los dispositivos bipolares tienen estructuras verticales. Los elementos básicos emisor, colector y base son colocados verticalmente, capa sobre capa, por difusión. Como se indica en la figura 2.4, la corriente fluye a través del bloque grueso de silicón (sustrato), a cierta distancia del interfase silicón - dióxido de silicón. Así, hay una protección inherente en estos dispositivos bipolares.

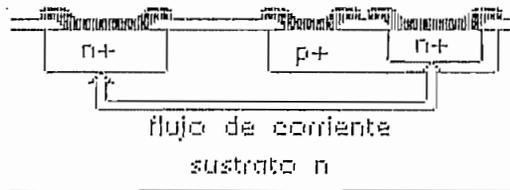


Figura 2.4 Transistor bipolar en un IC

Los dispositivos CMOS son componentes de efecto superficial, como se observa en la figura 2.5. Los elementos operativos de estos: compuerta, fuente y sumidero, están sobre la superficie, y el flujo de corriente ocurre horizontalmente a lo largo del dispositivo, muy próximo al interfase silicón - dióxido de silicón. Cambios en los parámetros de interfase, creados por la introducción de carga iónica superficial durante exposición, tiene efectos principales en la operación del transistor MOS, en contraste al efecto menos nocivo, sobre los transistores bipolares.



Figura 2.5 Transistor CMOS de un CI

## Estructuras del transistor CMOS

Los transistores MOS complementarios, o llamados CMOS, combinan dos tipos de dispositivos MOS, de canal P y de canal N, en una sola estructura funcional. La baja disipación de potencia y su alta estabilidad, resultado de esta combinación complementaria, resulta particularmente atractiva al diseñar unidades electrónicas portátiles, soportadas por baterías o aplicaciones donde la fuente sea de poca potencia.

Las estructuras MOS, de tipo P o N pueden trabajar de dos modos, acumulación o depleción. Para un transistor MOS de canal P operando por acumulación, la compuerta controla el flujo de corriente entre la fuente y el drenaje. En este dispositivo, un voltaje negativo aplicado desde la compuerta respecto a la fuente, propicia la creación de un campo eléctrico a lo largo del dieléctrico, bajo el electrodo de compuerta, como se indica en la figura 2.6, el campo produce una vía de cargas positivas para la circulación de la corriente, este canal permite la circulación de corriente entre fuente y drenaje. Esta forma de operación es conocida como de almacenamiento, debido a que, si la alimentación en la compuerta baja a cero, el dispositivo se apagará.

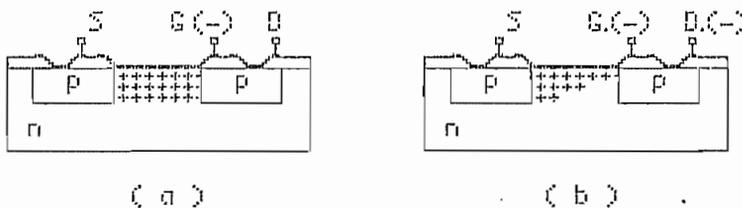


Figura 2.6 Acumulación de un MOSFET de canal P (PMOS)  
a)  $V_{ds} = 0$  y  $V_{gs}$  negativo. Las cargas móviles positivas inducidas (huecos) están localizadas en una capa muy fina en la superficie del semiconductor N. b)  $V_{ds}$  negativa y  $V_{gs}$  al mismo valor que en a).

El transistor MOS de canal N, figura 2.7, opera de manera similar al de canal P, excepto que se necesita aplicar un voltaje positivo a la compuerta, con respecto a la fuente, induciendo cargas negativas bajo ésta para crear la vía de circulación de corriente entre fuente y drenaje cuando el dispositivo esta encendido.

Los circuitos lógicos convencionales que usan la tecnología CMOS, son realizados solamente con dispositivos MOS de canal N o P en modo de acumulación. Los procesos para estos dispositivos, son diseñados para dar valores de voltaje umbral para ambos tipos de dispositivos de manera que se asegure una correcta operación de los dispositivos.

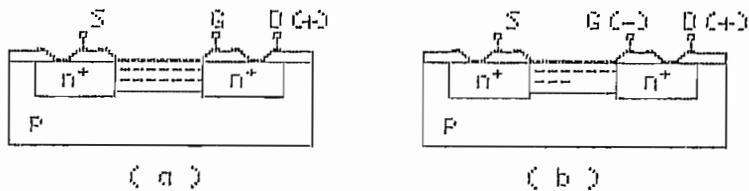


Figura 2.7 Estructura de un MOSFET de depleción de canal N (NMOS). (a)  $V_{GS}=0$  V. (b)  $V_{GS}$  negativo induciendo cargas positivas en el canal, que se recombinan con los electrones libres, reduciendo los portadores mayoritarios.

### Efecto de la radiación ionizante

La resistencia a la radiación del transistor CMOS es primariamente determinado por la formación de la compuerta, tanto en dispositivos de canal P, como en los dispositivos de canal N. La compuerta es usada para prender o apagar los dispositivos MOS; o sea, para arrancar o parar el flujo de corriente de la fuente al drenaje. La radiación ionizante induce cargas positivas no deseadas en la estructura de óxido de la compuerta.

La figura 2.8 presenta el mecanismo de crecimiento de carga debido a la radiación en una compuerta de óxido canal

N, durante la irradiación, para el peor caso de alimentación.

El impacto de radiación en el dispositivo induce cargas sobre los CMOS en operación, esto decrece el voltaje umbral del canal N,  $V_{TN}$ , e incrementa el voltaje umbral del canal P,  $V_{TP}$ . El problema más serio ocurre cuando suficiente disminución de  $V_{TN}$  causa que el dispositivo de canal N cambie la operación de acumulación a depleción, provocando un excesivo crecimiento en la corriente de alimentación, lo que disminuye la funcionalidad del circuito. El más severo stress en un dispositivo de canal

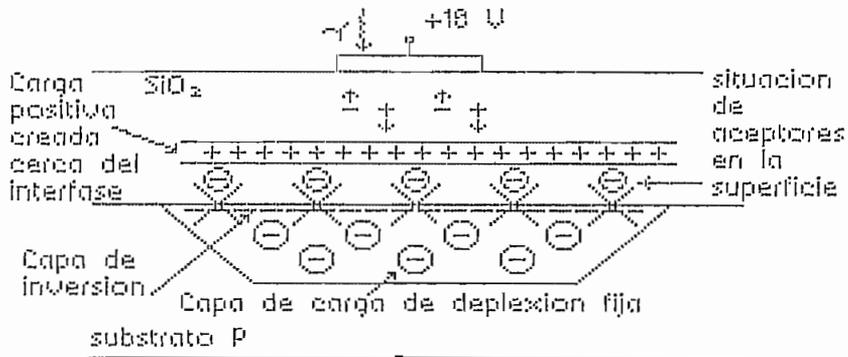


Figura 2.8 Mecanismos de creación de carga en la compuerta de un transistor de canal N durante la irradiación, para el peor caso de alimentación.

N ocurre cuando su compuerta es polarizada directamente durante la irradiación, haciendo que cargas positivas en el óxido sean conducidas cerca del interfase  $\text{Si-SiO}_2$ , conduciendo a la inversión del sustrato tipo P.

En operación normal, no aparece alimentación positiva entre la compuerta y el sustrato de los dispositivos de canal P, debido a que el sustrato está colocado al valor más positivo del potencial,  $V_{DD}$ . El efecto más severo en dispositivos de canal P durante la irradiación, ocurre

frecuentemente cuando se coloca la compuerta a cero voltios respecto al sustrato, colocando al interfase Si-SiO<sub>2</sub> en un estado capaz de sostener cargas positivas con voltajes negativos, aplicados a la compuerta, de manera que se incrementa el valor absoluto de  $V_{FP}$ , pero esto deteriora mucho menos la operación del circuito que el corrimiento del valor de  $V_{TN}$ .

### Funcionamiento bajo dosis de radiación

Cuando integrados CMOS son sujetos a grandes explosiones de radiación ionizante, pares electrón-hueco son creadas en el sustrato de silicón. La corriente resultante que fluye a través de sustratos P y N, de alta resistividad, puede causar diferencias de voltaje, que debilitarán el funcionamiento del circuito por una de las dos siguientes vías:

Primera: Latch-up. Un circuito CMOS contiene los elementos estructurales requeridos, para formar cuatro diodos Schockley de conmutación, como se ilustra en la figura 2.9. La juntura emisor base del elemento PNP lateral y el NPN vertical, que comprenden los diodos Schockley, son normalmente prevenidos de polarizarse directamente por la metalización del integrado. Debido a ésto, el diodo Schockley, estará apagado durante la operación normal.

Valores suficientemente altos de radiaciones explosivas pueden causar el flujo de corriente a través de las resistencias, que presentan los sustratos,  $R_N$  y  $R_P$ , esto causa la polarización directa de las juntas parásitas emisor-base de los dispositivos NPN y PNP, encendiendo los diodos. El flujo excedente de corriente de la fuente de alimentación, que acompaña el encendido de los diodos se ha establecido que ocurre para rangos de radiación de  $10^8$  a  $10^{10}$  rads(Si)/seg en muchos circuitos

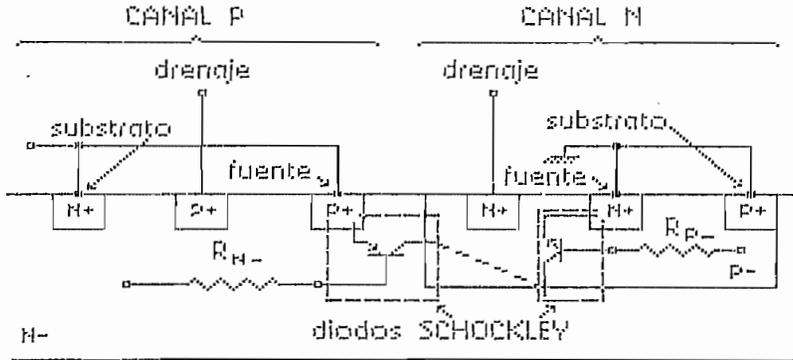


Figura 2.9 Corte en un circuito CMOS, indicando los componentes que actúan en el latch-up durante explosiones de radiación ionizante.

El circuito básico requerido para que se produzca el efecto latch-up se puede observar en la figura 2.10. Este consiste en dos transistores parasitos NPN y PNP, compartiendo una juntura común colector-base. Los dos requisitos necesarios para encender estos dispositivos son [1]:

1. El producto de las ganancias de la corriente común de emisor de los dos dispositivos,  $\beta_{PNP}$  y  $\beta_{NPN}$  deben satisfacer la relación:

$$\beta_{PNP} \times \beta_{NPN} < 1$$

y

2. La juntura emisor-base de los dos transistores debe estar polarizada directamente, llegando a valer 0.6 V. o más.

Durante la operación normal del circuito, la primera condición se puede lograr, pero no la segunda, permitiendo operar al circuito libre de este problema.

Este problema puede ser totalmente eliminado reduciendo a menos de la unidad, el producto de las ganancias de las corrientes comunes de emisor de los dispositivos, PNP y NPN que comprenden los diodos.

La tabla 2.6 [1] las dosis requeridas para que se presente el latch-up, a la memoria esática RAM de 256 bits MM54C200D/RH y al registro de desplazamiento CD4006D.

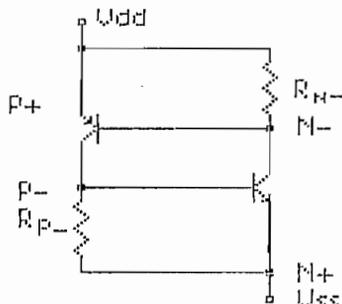


Figura 2.10 Circuito equivalente para que se produzca el latch-up en una estructura CMOS

Dispositivo	$V_{DD}$	Dosis requeridas para latch-up		Unidades
		no tratadas con neutrones	tratadas con neutrones*	
CD4006	10 V	$>9.4 \times 10^9$	$>9.4 \times 10^9$	Rad(Si)/s
CD4011	10 V	$>3.1 \times 10^9$	$>9.4 \times 10^9$	Rad(Si)/s
CD4012	10 V	$>2.0 \times 10^9$	$>2.4 \times 10^9$	Rad(Si)/s
CD4053	10 V	$>3.3 \times 10^8$	$>9.4 \times 10^9$	Rad(Si)/s
MM54C200	5 V	$>2.2 \times 10^{10}$	$>8.8 \times 10^{11}$	Rad(Si)/s

\* Las partes tratadas han sido sujetas a un flujo de  $1 \times 10^{14}$  neutrones rápidos/cm<sup>2</sup>.

Tabla 2.6 Resistencia de componentes al latch-up

Segundo: Pérdida de información (Data-upset). Este efecto produce la pérdida de los datos almacenados en un circuito, una vez expuesto a radiaciones explosivas. Este fenómeno concierne más a memorias y registros de desplazamiento, donde los datos almacenados no están directamente acoplados al circuito de entrada. El problema es aparentemente causado

durante la exposición, a explosiones de radiación ionizante, cuando uno o más de los dispositivos bipolares parásitos del circuito, se han encendido y llegan a causar el flujo de corrientes asimétricas en los circuitos de almacenamiento, provocando la inversión de los datos contenidos en éstos.

La tabla 2.7 [1] presenta el efecto que produce un tratamiento experimental con flujo de electrones, a la memoria esática RAM de 256 bits MM54C200D/RH y al registro de desplazamiento CD4006D. El efecto de la degradación de la ganancia de los dispositivos parásitos en este fenómeno no es tan dramática como en el latch-up.

Flujo de neutrones (neutrones rápidos/cm <sup>2</sup> )	Dosis necesaria para inducir pérdida de datos		Unidades
	CD4006D Vdd=10 V	MM54C200D Vdd=5 V	
0	4.7x10 <sup>8</sup>	1.76x10 <sup>8</sup>	Rad(Si)/s
10 <sup>14</sup>	4.7x10 <sup>8</sup>	2.00x10 <sup>8</sup>	Rad(Si)/s
10 <sup>15</sup>	-----	5.00x10 <sup>8</sup>	Rad(Si)/s
10 <sup>16</sup>	-----	1.17x10 <sup>8</sup>	Rad(Si)/s

CD4006D es un registro de desplazamiento y MM54C200D es una memoria RAM de 256 bits.

Tabla 2.7 Resistencia de componentes a la pérdida de datos

### Protección contra radiaciones ionizantes.

Un centro de cómputo, ubicado en lugares expuestos a grandes cantidades de radiación ionizante necesita de protección. La forma de proteger el equipo, va desde el uso de gruesas paredes de concreto al de deflectores de partículas, en las afueras del centro de cómputo. Para bajos niveles de radiación en el lugar donde se ubicará el equipo electrónico, basta usar gruesas paredes de concreto. Energías mayores, (partículas más penetrantes) implican el uso de paredes con blindajes, formados por planchas de

metales pesados, son usuales las planchas de plomo. Conforme la radiación aumenta en intensidad, es necesario que las paredes del centro de cómputo, sean de concreto reforzado y planchas de plomo cada vez más gruesas.

### 2.3 CARACTERISTICAS DE PROTECCION CONTRA VIBRACIONES.

Uno de los parámetros influyentes en la operación del equipo electrónico en un centro de cómputo, es la vibración mecánica. Esta no deber exceder los valores indicados por el fabricante de los mismos. Las vibraciones sobre el equipo electrónico causarían diferentes niveles de daños, que van desde el aterrizaje de las cabezas de las unidades de disco hasta la destrucción parcial y total del equipo.

Es conocido, que las cabezas lectoras en una unidad de disco virtualmente "vuelan" sobre la superficie rotatoria del mismo, sobre una capa de aire de pocas millonésimas de pulgada de altura. Los brazos que sostienen las cabezas se mueven de pista a pista, pero estas nunca tocan la superficie del disco que esta girando. Si en algún momento, y mientras se está escribiendo o leyendo información, la unidad recibe una vibración fuerte o un golpe, las cabezas de la unidad de disco aterrizarán, lo que a la postre puede dañar las cabezas o perder información, si se estuvo almacenando ésta.

Vibraciones un poco más fuertes, junto con aumentos de temperatura podrían romper los contactos internos y/o externos de los circuitos integrados.

Los factores indicados obligan a tener un control sobre los niveles de vibración.

La tabla 2.8 [3] indica las fallas más comunes en equipos electrónicos, sujetos a pruebas de temperatura y vibración, conocidas como ESS (Environmental stress

screening).

Tipo de defecto	Fallas debido a efectos	
	térmicos	vibratorio
Partes rotas	X	X
Parte mal ubicada	X	
Falla en un punto de suelda	X	X
Falla en el grabado (etching)	X	X
Pérdida de contacto		X
Mala aislación de un cable	X	
Pérdida de la terminación de un cable	X	X
Rigidez impropia	X	
Contaminación	X	
Destrucción		X
Pérdidas en el hardware		X
Agrietamiento mecánico		X

Tabla 2.8 Fallas más comunes provocadas por el ESS

### 2.3.1 Consideraciones acerca de las vibraciones

#### Definiciones básicas.

Vibración es el término básico que define el acto de movimiento dinámico. Escencialmente hay tres parámetros fundamentales, involucrados en el análisis de vibraciones, estos son: aceleración, desplazamiento y velocidad. La aceleración es monitoreada en términos de "g". El desplazamiento está medido en términos de cm., y la velocidad en cm. sobre segundo. Se dice que un cuerpo vibra cuando realiza un movimiento oscilante respecto a una posición de referencia. El número de veces por segundo que se realiza el ciclo completo se llama frecuencia, y se mide en Hz. El movimiento puede constar de un componente a una frecuencia, como en un diapasón o varias de ellas simultáneas, como se indica en la figura 2.11.

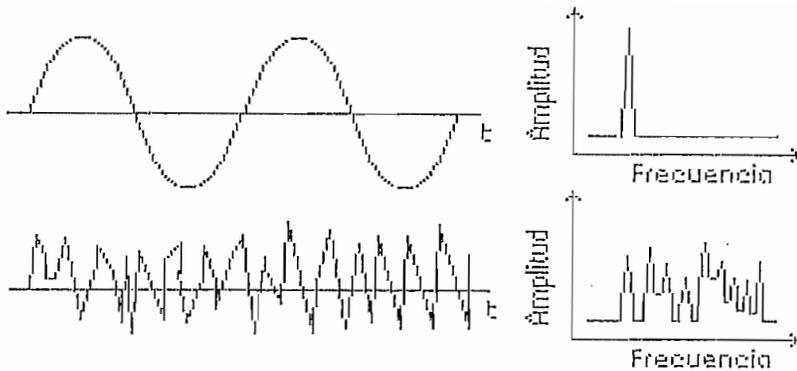


Figura 2.11 Tipos de vibraciones

Las vibraciones suelen constar, en la práctica, de muchas frecuencias simultáneas, de modo que por simple exámen de su relación amplitud - tiempo no se puede saber cuantos elementos vibran y a que frecuencias.

Los componentes de vibración pueden evidenciarse, representando las amplitudes de la vibración en función de la frecuencia. La descomposición de las señales en componentes singulares de frecuencia se llama análisis de frecuencia, técnica que puede considerarse la piedra angular de estas medidas. El gráfico de niveles de vibración en función de la frecuencia se llama espectrograma de frecuencias.

**Transitorios.-** Son vibraciones intermitentes y no causan una respuesta resonante sostenida en los equipos.

**Vibraciones continuas.-** Son vibraciones presentes sobre un extenso período de tiempo y causan una respuesta resonante sostenida en el equipo.

**Shock.-** Shock se define como aquella excitación transitoria que tiene una tasa de repetición y además un tiempo de duración más pequeño que el necesitado por el equipo para responder a ésta y retornar a la condición de estado

estable.

**Vibración sinusoidal.**- Vibración de características sinusoidales.

**Desplazamiento.**- Magnitud de la forma de onda; normalmente dada en desplazamiento de pico a pico en unidades métricas o inglesas:

- Normalmente usadas para medir las vibraciones del suelo, a bajas frecuencias.
- Si la frecuencia es conocida, el desplazamiento puede ser convertido a "g" para una onda sinusoidal. "g" es la cantidad de aceleración causada por la fuerza de gravedad.

NOTA: Algunos instrumentos de medida pueden convertir el desplazamiento a "g" para formas de onda sinusoidales o complejas.

**Aceleración.**- Normalmente medida en múltiplos de la aceleración "g". Si la frecuencia de una onda sinusoidal es conocida, la aceleración puede ser calculada del desplazamiento.

**RMS.**- Viene de la expresión average root mean square y es el valor medio cuadrático de la aceleración o amplitud. Esta es normalmente usada, como medida de la vibración completa, para vibraciones estocásticas. Este valor es el más significativo, por que, tiene en cuenta la historia de la onda y da un valor de la amplitud, relacionada directamente con la energía y, por ello, con la capacidad destructora de la vibración.

**Pico.**- Es el máximo valor de vibraciones randómicas o sinusoidales. Esta puede ser expresada como pico a pico para vibraciones de desplazamiento sinusoidal. Este valor

es útil para indicar los niveles de choque de corta duración. Pero, como se aprecia en la figura 2.12 sólo indica el valor máximo alcanzado, sin tomar en consideración la historia, en el tiempo, de la onda.

**Media.**- Es el valor medio rectificado que hace intervenir la historia de la onda, pero se considera de poco interés práctico, por que no guarda relación directa con ninguna magnitud física útil.

**Unidades.**- La velocidad, aceleración y el desplazamiento se miden en unidades SI, m, mm,  $\mu\text{m}$  para desplazamiento; m/s, mm/s para velocidad y  $\text{m/s}^2$  para aceleración. La constante de la gravedad "g" sigue siendo muy usada para indicar la aceleración.

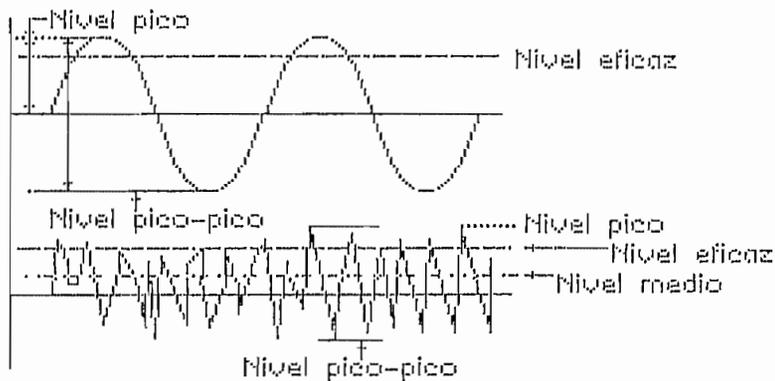


Figura 2.12 Características de una onda de vibración

### Límite para vibración de equipos. [8]

Existen tres clases de medio ambientes vibratorios, estos son:

V1.- Máquinas montadas en el piso en un medio ambiente de oficina.

V2.- Sobre una mesa y máquinas montadas sobre la pared.

V3.- Ambiente industrial pesado y equipo móvil.

Un sumario de los límites de vibración para cada una de las tres clases, es el siguiente:

Clase	Mils Pico a pico	G	G
	5 - 17 Hz	17 - 200 Hz	200 - 500 Hz
V1CH	1.3	0.021	0.013
V1TH	2.0	0.035	0.023
V1CL	2.4	0.040	0.025
V1TL	3.6	0.060	0.040
V2C	5.2	0.070	0.036
V2T	7.9	0.110	0.055
V3C	30.0	0.150	0.075
V3T*	37.1	0.180	0.090

\* La frecuencia de cruce desplazamiento a aceleración es 10 Hz en vez de 17 Hz.

Donde :

T = Transiente

C = Continuo

G = Unidad de aceleración causada por la gravedad

H = Peso mayor que 1500 libras (6674.724 N)

L = Pesos menores que 440 libras (1957.92 N)

Mils = Unidad inglesa equivalente a 0.001 pulgadas  
( $2.54 \times 10^{-3}$  cm.)

Para pesos de clase V1 entre 440 y 1500 libras, se usa la siguiente fórmula de interpolación lineal:

$$V = \frac{V440 - [(W - 440)(V440 - V1500)]}{1060}$$

Donde:

V = nivel de vibración, V440 = "g" o desplazamiento a

440 libras,  $W$  = Peso de la máquina en cuestión, y  $V_{1500}$  = "g" o desplazamiento a 1500 libras.

Estos límites de vibración están basados en cálculos del peor caso para sistemas IBM. Habitualmente el medio ambiente no excederá estos límites, excepto para casos anormales que involucran construcción, destrucción, terremotos o impacto directo.

Los límites especificados de vibración, normalmente no se exceden bajo las siguientes condiciones:

- Vibración continua que es perceptible por el ser humano, pero no es incómodo o distrayente.
- Vibraciones transitorias que son distrayentes o molestosas, pero no intolerables.

#### Medición y control de las vibraciones.

La forma más simple como un objeto puede vibrar es sinusoidalmente. Este tipo de vibración que tiene el movimiento característico de un péndulo, posee una sola frecuencia y una sola amplitud que puede ser medida en términos del desplazamiento, velocidad o aceleración.

A cierta frecuencia, estos parámetros, (desplazamiento, velocidad y aceleración) están relacionados directamente unos con otros. La medición de la amplitud de una vibración, puede ser matemáticamente o electrónicamente convertida a las otras dos. Esta característica ensancha las vías para medir las vibraciones.

Si se capta la aceleración, no se queda limitado a ésta función, porque con integradores electrónicos se puede pasar de ella a velocidad o desplazamiento. Casi todos los

vibrómetros modernos están preparados para medir las tres funciones.

Cuando se hace una medida singular de banda ancha de vibración, es importante la elección de la función si la señal tiene componentes a muchas frecuencias. El desplazamiento da mayor peso a los componentes de baja frecuencia y, a la inversa, la aceleración da a las de alta frecuencia.

La experiencia ha demostrado que el valor eficaz global de velocidad de las vibraciones, medido en la gama de 10 a 100 Hz [14], proporciona el mejor índice de severidad de las mismas, también indica que, un nivel dado de velocidad se corresponde con otro de energía, de tal manera que, vibraciones de frecuencias bajas y altas reciben igual ponderación, desde el punto de vista de energía de vibración. En la práctica, el espectro de velocidad de muchos aparatos es razonablemente plano.

Al realizar análisis de frecuencia en banda estrecha, la elección de la función a medir, se reflejará en la forma del gráfico (su inclinación, etc). Esto lleva a una consideración práctica que puede afectar dicha elección. Es ventajoso elegir, la función que tenga el espectro de frecuencia más plano, para una utilización óptima de la gama dinámica (diferencia entre los valores máximos y mínimos que se pueda medir) de la instrumentación. Por esto se suele elegir la aceleración o velocidad para análisis de frecuencia a esta banda.

Como la aceleración sobrepondrá los componentes de alta frecuencia se tiende a usarla cuando la gama de interés incluye las altas frecuencias.

**Sensores de velocidad.** Estos sensores han sido tradicionalmente los dispositivos favoritos para la

medición de las vibraciones por muchas razones. Ellos son insensibles al método de montaje y, en muchos casos, solo se necesita sujetarlos contra la máquina que se está probando para obtener una lectura de la vibración. Este último atributo los hace particularmente adecuados para monitores portátiles de vibración. Los sensores de velocidad generan a la salida una gran señal de voltaje, en milivoltios, la cual puede ser toscamente medida conectando directamente la salida a un voltímetro RMS.

**Sensores de aceleración (acelerómetros).** Estos sensores están siendo usados cada vez más en la medición de las vibraciones, y ofrecen el rango más amplio de frecuencia de los tres tipos de sensores. Se dispone de un amplio rango de acelerómetros; estos instrumentos son pequeños y robustos y no necesitan calibración. La salida eléctrica débil que proporciona el acelerómetro no es problema con los equipos electrónicos, en los cuales la señal es amplificada, ésta como se dijo puede ser electrónicamente integrada dando la respuesta de salida, en unidades de velocidad o desplazamiento. Los acelerómetros son bastantes sensibles a los métodos de montaje, por lo tanto acelerómetros portátiles introducirán errores en la medición de la señal de la vibración. Si se seleccionan acelerómetros para mediciones periódicas se usan pickups magnéticos o, la máquina viene provista de tuercas para que, los sensores, sean firmemente montados al equipo.

**Sensores de desplazamiento y proximidad.** Son usados para medir desplazamientos axiales y radiales en grandes máquinas, con monitoreo de vibración constante. Estos sensores sin contacto con el equipo incluyen un probador y un oscilador/demodulador; el oscilador provoca corrientes de Eddy en placas metálicas sobre el equipo, sin tocarlo. No se dispone de sensores de proximidad para monitoreo periódico, debido a que éstos, requieren instalación.

**Frecuencias múltiples.** En la práctica, naturalmente, ninguna vibración es puramente sinusoidal o a una sola frecuencia. La vibración es causada por diferentes fuerzas, actuando con una o más frecuencias de resonancia natural. Una complicación adicional está en que no todos los mecanismos o fuerzas causantes de la vibración, son lineales. En un sistema lineal, la fuerza de recuperación sobre los componentes de la máquina, es proporcional a su desplazamiento, esto es fundamental para vibraciones sinusoidales. En sistemas no lineales, la respuesta está limitada por algunas influencias anulantes, como puede ser la causada por un tope de goma o un tope mecánico.

Si un sensor de velocidad es fijado a una máquina y su salida es conectada a un voltímetro, su lectura será, una medición cuantitativa de todos los niveles de vibración, a todas las frecuencias, o simplemente, la energía del mecanismo vibrante. Esto se conoce como señal de vibración no filtrada y es ampliamente usada para detectar cambios totales en la vibración del equipo.

**Caracterización de la señal.** Cualquier señal de vibración compleja o no lineal, puede ser expresada como suma de un gran número de vibraciones sinusoidales a diferentes frecuencias y amplitudes, usando la técnica matemática conocida como análisis de Fourier. La magnitud de una de estas componentes puede ser electrónicamente medida al pasar la señal del sensor a través de un filtro pasabanda, de manera que el medidor solo mire la magnitud de la vibración a esa frecuencia específica. El filtro actúa como el sintonizador de un radio fijando y haciendo posible examinar la vibración resultante de una causa específica. El filtro sintonizado es el instrumento más sencillo que permite examinar los diferentes componentes de frecuencia de la señal de vibración. Los analizadores de vibración basados en la transformada rápida de Fourier (FFT), proporcionan una forma instantánea para examinar los

diferentes componentes de frecuencia de vibración de una máquina y es el instrumento básico en el análisis de las vibraciones. La versión original de este instrumento contiene algunos filtros de frecuencia fijos, para detectar la amplitud de la vibración, alrededor de 400. Con la disponibilidad actual de elementos digitales, la señal de vibración es convertida, de analógica a digital, y el cálculo de las componentes de Fourier se realiza en pocos segundos. Este mismo equipo permite el cálculo de la amplitud de las vibraciones, así como, la velocidad y el desplazamiento.

#### El acelerómetro piezoeléctrico.

El transductor más ampliamente usado actualmente para la medición de las vibraciones; es el acelerómetro piezoeléctrico. En conjunto presenta mejores características que cualquier otro tipo de captador. Tiene gamas de frecuencias y dinámica muy extensas y muy buena linealidad en todas ellas. Es relativamente robusto y fiable, y sus características permanecen estables durante largos períodos de tiempo. Además, como piezoeléctrico, es generador de cargas y no necesita fuente de alimentación, no tiene partes móviles, que se desgasten y, finalmente, su salida proporcional a la aceleración, se puede integrar para disponer de señales proporcionales a la velocidad o al desplazamiento.

El núcleo del acelerómetro piezoeléctrico es una lámina de material activo, de ordinario, cerámica piezoeléctrica polarizada artificialmente, con acentuado carácter piezoeléctrico. Cuando sufre tensiones mecánicas, sean de tracción, compresión o cortadura, genera cargas eléctricas entre sus caras, en número proporcional a la fuerza aplicada.

Diseño práctico de acelerómetros. El elemento piezoeléctrico se dispone en los acelerómetros de forma que, el conjunto vibra, la masa aplica sobre él una fuerza que es proporcional a la de la vibración según la ley fuerza = masa x aceleración. Para frecuencias muy por debajo de la de resonancia del sistema completo, la aceleración de la masa es la misma que la de la base y la señal de salida será proporcional a la de aceleración a la cual el acelerómetro está sometido.

Se fabrican ordinariamente dos tipos de acelerómetros: El Tipo de compresión, en el que la masa ejerce una fuerza de compresión sobre el elemento activo, y el Tipo de cortadura, donde ésta ejerce una fuerza de cortadura sobre el elemento activo.

Tipos de acelerómetros. La mayor parte de fabricantes, tienen una extensa gama de acelerómetros que, al principio, puede parecer que dificulta la elección. El pequeño grupo de, los de aplicación general, bastarán para casi todos los casos. Se fabrican con conector de cabeza o lateral y tienen sensibilidades de 1 a 10 mV, o pC, por  $m/s^2$ . Los tipos UNIGAIN, de Bruel & Kjaer son de sensibilidad normalizada a una cifra cómoda, 1 o 10 pC/ $ms^{-2}$ , para facilitar la calibración del sistema de medida.

Los demás acelerómetros tienen una característica orientada a aplicaciones particulares. Por ejemplo, los de pequeño tamaño están pensados para medidas de altos niveles, o a altas frecuencias, y empleo en estructuras delicadas como, paneles, etc., pues pesan solo de  $\frac{1}{2}$  a 2 gramos. Otros tipos, se optimizan para otras aplicaciones: medidas simultáneas en tres ejes perpendiculares entre sí, altas temperaturas, niveles de vibración muy bajos, choques de nivel muy alto, calibración por comparación de otros acelerómetros, y monitoreo permanente de las vibraciones en las máquinas industriales.

Características de los acelerómetros. La sensibilidad es la característica que se suele considerar en primer lugar. En principio, convendría un elevado nivel de salida, pero hay que llegar a un compromiso porque las altas sensibilidades implican elementos activos grandes y, así, conjuntos grandes y pesados.

En los casos normales, la sensibilidad no es problema grave, porque los modernos preamplificadores se diseñan para señales de bajo nivel. La masa del acelerómetro tiene importancia al medir en elementos ligeros, pudiendo alterar mucho los niveles y las frecuencias en el punto de medida.

En general, la masa del captador no puede ser superior a 1/10 de la masa dinámica de la pieza a la que se monte.

Cuando se quieran medir niveles anormalmente altos o bajos se debe atender a la gama dinámica del acelerómetro. El límite inferior indicado en la figura 2.13 no suele venir determinado por el acelerómetro, sino por el ruido eléctrico de sus cables y los circuitos del amplificador. Este límite suele ser de solo una centésima de  $m/s^2$  con aparatos de aplicación general.

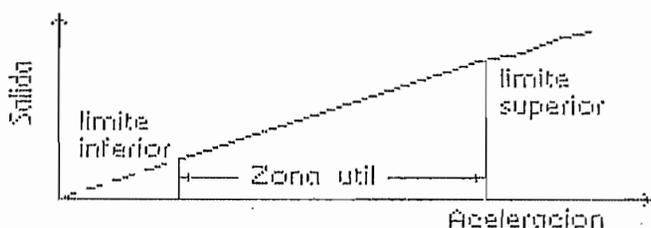


Figura 2.13 Gama dinámica del acelerómetro

El límite superior, viene fijado por la resistencia estructural del acelerómetro. Un acelerómetro típico de aplicación general es lineal hasta 50000 a 100000  $m/s^2$  [6], que es el orden de los choques mecánicos. Un acelerómetro diseñado para medir choques mecánicos puede ser lineal hasta 1000  $km/s^2$  (1000g).

**Supresión de errores de resonancia del acelerómetro.** Como los acelerómetros presentan, por su resonancia, un aumento de su sensibilidad en el extremo de altas frecuencias, no dan una información fiel de las vibraciones en el punto de medida.

Al analizar una vibración, se reconoce fácilmente si un pico en altas frecuencias se debe a la resonancia y, de ser así, basta con ignorarlo. Pero cuando se toma una lectura en banda ancha que incluya resonancia del acelerómetro, el resultado será falso si, a la vez, la vibración a medir tiene componentes en la zona en torno a la resonancia.

El problema se subsana eligiendo un acelerómetro con la suficiente gama de frecuencias, o usando un filtro pasa bajos, que normalmente se incluye en los vibrómetros y preamplificadores, para eliminar la señal indeseada producida por la resonancia del acelerómetro.

Cuando las medidas se limitan a bajas frecuencias, las altas y los efectos de la resonancia se pueden eliminar con filtros mecánicos. Estos constan de elementos elásticos de goma, pegados entre dos discos de montaje, que se colocan entre el acelerómetro y el punto de medida, éstos reducen el límite de frecuencia superior, a valores entre 0.5 y 5 kHz.

**Elección del punto de colocación del acelerómetro.** El acelerómetro debe ser colocado, de tal manera que la dirección de medida deseada, coincida con la de su máxima sensibilidad. Los acelerómetros son también sensibles a las vibraciones en sentido transversal, pero se suele ignorar este hecho, pues, la sensibilidad transversal es menor al 1% de la principal.

La razón para realizar la medida sugerirá, de

ordinario, el punto idóneo de medida. Las respuestas de los objetos a las vibraciones forzadas constituye un fenómeno complejo, y por ello pueden esperarse niveles y espectros de frecuencia distintos, incluso en puntos cercanos del mismo objeto.

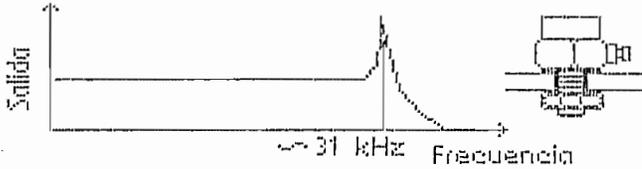


Figura 2.14 Colocación del acelerómetro por medio de un vástago roscado y una tuerca

Colocación del acelerómetro. [6] La forma de colocar el acelerómetro en el punto de medida, es un factor crítico para obtener en la práctica datos precisos. Los montajes sueltos, dan lugar a una reducción de la frecuencia de resonancia del acoplamiento y, por lo tanto, de la gama en frecuencia útil del captador. El montaje ideal utiliza un vástago roscado que se atornilla en el punto de medida, como se indica en la figura 2.14. la colocación de una capa delgada de grasa en la superficie de montaje, antes de apretar el acelerómetro, mejorará de ordinario la rigidez del conjunto. El orificio taladrado debe ser suficiente, para que el tornillo se apoye contra la base del acelerómetro. La figura 2.14 indica además una curva de respuesta típica de un acelerómetro de aplicación general, colocado por vástago de fijación sobre una superficie plana. La frecuencia de resonancia aplicada se aproxima a los 32 kHz, que es la correspondiente a la calibración en fábrica, en la cual la superficie de montaje es muy plana y lisa.

Otro sistema de colocación muy usado consiste en el pegado del acelerómetro al punto de medida, con una delgada capa de cera de abejas. Como se observa en la curva de respuesta, en la figura 2.15, la resonancia solo se reduce

ligeramente (a 29 kHz). Como la cera se ablanda con la temperatura, su empleo está limitado a unos 40 °C. En superficies limpias, la fijación con cera se puede usar hasta niveles de unos 100 m/s<sup>2</sup>.

Cuando hay que establecer en una máquina, puntos permanentes de medida y no se desea taladrar orificios de

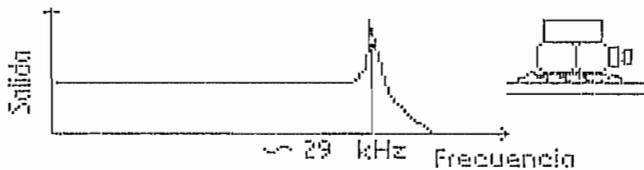


Figura 2.15 Colocación del acelerómetro mediante cera de abejas.

fijación, se puede usar soportes cementables, que se fijan al punto de medida con un adhesivo enérgico, se recomiendan las resinas epoxy y los cianocrilatos, por que los adhesivos blandos pueden reducir considerablemente, la gama útil del acelerómetro.

Cuando hay que aislar eléctricamente el cuerpo del acelerómetro del punto de medida, se usa una arandela de mica y un vástago. Esto busca eliminar los lazos de masa (que se detallarán más adelante).

Un imán permanente, puede ser otro sencillo método de fijación, cuando el punto de medida está sobre superficie magnética plana. También esto aísla eléctricamente al acelerómetro. Este método reduce la frecuencia de resonancia del acelerómetro a unos 7 kHz y, por ello, no se puede usar más allá de los 2 kHz. La fuerza de sujeción del imán, es suficiente para niveles de 1000 a 2000 m/s<sup>2</sup>, según el tamaño del acelerómetro

Finalmente, para exploraciones rápidas es muy conveniente una sonda manual con el acelerómetro montado al

extremo, pero puede producir considerables errores por su baja rigidez global. Con ella no se puede esperar resultados repetibles. Se debe usar un filtro pasabajos para reducir la gama de medida a 1000 hZ. En las figuras 2.16 y 2.17 se puede observar la respuesta del acelerómetro para los cuatro últimos métodos indicados.

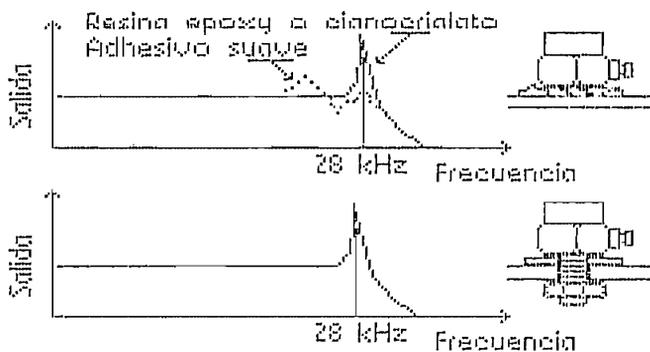


Figura 2.16 Colocación del acelerómetro mediante pegamento y vástago aislado con arandela de mica.

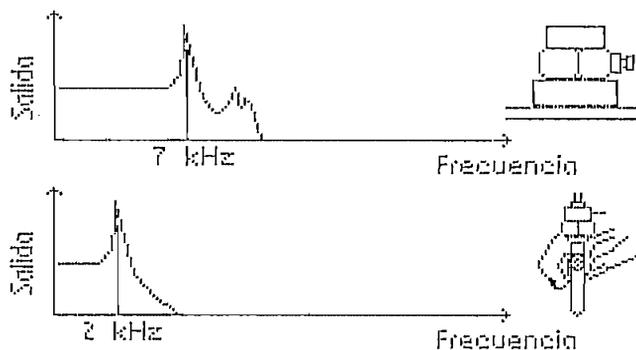


Figura 2.17 Colocación del acelerómetro mediante un imán y por medio de soporte manual.

De los métodos citados cabe eliminar dos que posiblemente no se usarán por obvias razones para el monitoreo de vibraciones sobre un equipo de computación, éstos son, por fijación con tornillos e imán.

Influencias ambientales. Los modernos acelerómetros y sus

cables se han diseñado para que presenten la mínima sensibilidad posible a diferentes influencias exteriores, entre las que se puede citar:

- humedad
- fluctuaciones de la temperatura
- radiaciones nucleares
- temperatura ambiente
- lazos de masa
- deformaciones en la base de fijación
- ruido acústico
- sustancias corrosivas
- interferencia electromagnética
- vibraciones transversales y
- ruidos de fricción

A pesar de ello, ambientes más adversos necesitan acelerómetros especiales. A continuación se detallarán cada uno de los parámetros citados:

**Humedad.** Los acelerómetros normalmente son impermeables a la humedad, bien pegados con resinas epoxy o por soldadura para garantizar su confiable funcionamiento en medios húmedos. Para cortos empleos en líquidos, o cuando se esperan grandes condensaciones, se recomienda cables impermeabilizados con teflón. El conector del acelerómetro se debe también sellar con goma o masilla impermeable, a temperatura ambiente y no ácida. Para empleo permanente en zonas húmedas o mojadas se deben emplear acelerómetros industriales.

**Temperatura.** Los acelerómetros típicos de aplicación general pueden tolerar temperaturas de hasta 250°C. A valores mayores, la cerámica piezoeléctrica empieza a despolarizarse y se modifica su sensibilidad. El acelerómetro se puede seguir usando tras recalibración si la despolarización no es excesiva. Existen acelerómetros de

cerámica especial utilizables hasta 400°C.

Todos los materiales piezoeléctricos presentan dependencia de la temperatura: los cambios de temperatura ambiente resultan en cambios de sensibilidad. Por ello, los acelerómetros normalmente se suministran con una curva temperatura sensibilidad, para poder corregir los niveles leídos cuando las medidas se realicen a temperaturas significativamente distintas a los 20°C.

Los acelerómetros piezoeléctricos también presentan una salida variable cuando están sometidos a pequeñas fluctuaciones de temperatura conocidas como transitorios de temperatura. Esto suele ser problema con niveles o frecuencias de medida muy bajos. Los actuales acelerómetros de cortadura son muy poco sensibles a estos transitorios. Cuando hay que fijar a los acelerómetros a superficies con temperaturas superiores a los 250°C se puede colocar, entre la base y la superficie de contacto, un sumidero de calor y una arandela de mica. De esta forma se puede mantener la base a menos de 250°C para temperaturas superficiales entre 350 y 400°C. Una corriente de aire de refrigeración puede ser una ayuda adicional.

**Radiaciones nucleares.** La mayor parte de los acelerómetros se pueden usar bajo dosis de radiación de 10 kRad/h, hasta radiaciones acumuladas de 2 MRad, sin cambio significativo sobre sus características. Y algunos se pueden usar con mayores intensidades y dosis acumuladas muy superiores a los 100 MRad.

**Lazos de masa.** A veces circulan corrientes de lazos de masa en las pantallas de los cables, porque el acelerómetro y el equipo de medida tienen tierras separadas. El lazo de masa, se rompe aislando eléctricamente la masa del acelerómetro de la superficie de montaje, mediante un vástago aislante y una arandela de mica.

**Deformación de la base.** Cuando un acelerómetro se monta en una superficie sometida a variaciones de tensión mecánica, se produce una salida, como resultado de las tensiones mecánicas transmitidas a los elementos sensibles. Para minimizar este efecto los acelerómetros se fabrican con bases gruesas y rígidas.

**Ruido acústico.** Los niveles acústicos presentes en la máquina no suelen ser suficientes para producir errores significativos en la medida de las vibraciones. Normalmente, las vibraciones inducidas por el ruido en la estructura sobre la que está montado el acelerómetro tiene más importancia que la excitación recibida por el aire.

**Sustancias corrosivas.** Los materiales usados en la fabricación de la mayoría de los acelerómetros son muy resistentes a la mayor parte de los agentes corrosivos comunes.

**Interferencias electromagnéticas.** Esto suele producirse cuando el cable del sensor se encuentra cerca de un equipo en funcionamiento. La sensibilidad magnética de los acelerómetros piezoeléctricos es muy baja y, normalmente, inferior desde 0.01 a 0.25 m/s<sup>2</sup> por kilogaudio, para la más desfavorable orientación del acelerómetro en el campo magnético.

**Vibraciones transversales.** Los acelerómetros piezoeléctricos son sensibles a las vibraciones en direcciones distintas a las de sus ejes principales. En el plano transversal, perpendicular al eje principal, la sensibilidad es inferior al 3% o 4% de la del eje principal (típicamente 1%). Pero como la frecuencia de resonancia transversal suele ser del 1/2 de la del eje principal se debe tener en cuenta este fenómeno cuando hay niveles apreciables de vibraciones transversales.

Ruidos de fricción. Este suele inducirse en el cable por el movimiento del mismo. Se debe a variaciones locales de capacidad y cargas producidas por flexión, compresión y tensión dinámicas de las capas que forman el cable. El problema se evita con cables grafitados y fijándolos, o pegándolos, lo más cerca, que se pueda, del acelerómetro.

## 2.4 CARACTERISTICAS DE PROTECCION CONTRA OTROS FENOMENOS.

Diferentes tipos de fallas, que podría afectar el normal funcionamiento de un sistema de computación provienen de las fuentes de transitorios. Las fuentes de transitorios en un circuito incluyen la descarga electrostática, los componentes inductivos propios del circuito, relámpagos e impulsos electromagnéticos, provenientes de explosiones nucleares. De éstos, algunos ya han sido tratados en dos numerales anteriores, mientras que de los restantes, se ocupará brevemente este numeral. Las características de estos transitorios, tales como tiempo de crecimiento, duración, amplitud e impedancia de las fuentes, dependen de la fuente de transitorios así como de las características propias del circuito como se lo puede observar en la figura 2.18.

### 2.4.1 Incidencia de los relámpagos en un sistema de computación.

La fuente más obvia de ruidos eléctricos es la caída de un relámpago. Es conveniente tomar en cuenta que no es necesario que el rayo caiga sobre las líneas de potencia para causar daños, esto se debe a que el campo electromagnético radiado por la corriente del rayo, se acopla con los conductores de las líneas de potencia o líneas de datos, induciendo voltajes transitorios a lo largo de estos conductores. Además, como la corriente del rayo se riega en la tierra, esto produce, diferencias de potencial en puntos que normalmente están al " potencial de

tierra ", de manera que los conductores extendidos en el área donde se ha esparcido la corriente del rayo, estarán expuestos a las diferencias de potencial y sobrevoltajes citados.

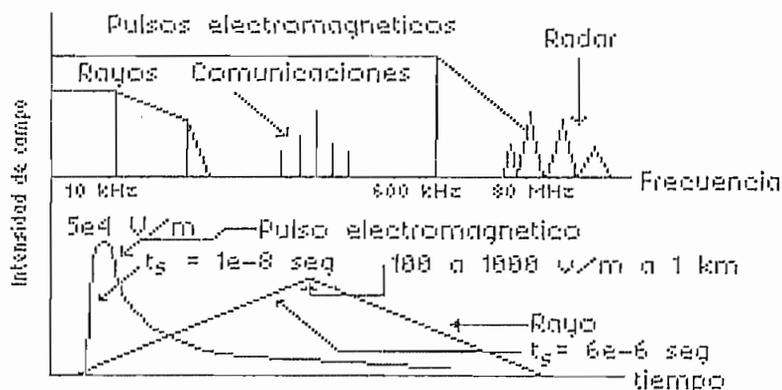


Figura 2.18 Características de diferentes señales

Aunque el impacto directo de un rayo es dramático, su relativamente pequeña tasa de ocurrencia, constituye una ventaja, de tal manera que sus amplios efectos indirectos, pueden ser subsanados, mediante técnicas de protección. La forma como este fenómeno, afecta a un circuito de un sistema digital, es similar a lo que se explicó en el numeral 2.2 para la descarga electrostática.

#### 2.4.2 Ruido por conmutación en sistemas de potencia.

La menos notoria, pero más frecuente, fuente de transitorios es la conmutación de interruptores en sistemas de potencia. Este fenómeno puede ser tan vulgar como prender y apagar el sistema de iluminación del local donde se encuentra el equipo de computación. Este tipo de transitorios cubren un amplio rango de frecuencias y amplitudes. Algunos tienen una corta duración (nanosegundos) y envuelven pequeños niveles de energía (milijoules). Mientras estos presentan un pequeño riesgo de daño, sus espectros de alta frecuencia les asemeja a fuentes de interferencia. Otros tienen una larga duración

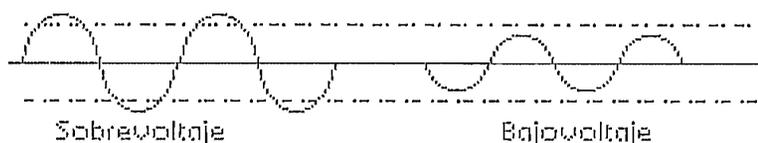
(microsegundos y aún milisegundos) y llevan gran cantidad de energía (sobre los cientos de joules) en baja frecuencia, y no pueden ser tratados como de bajo riesgo o simplemente como interferencias, debido a su relativamente, baja frecuencia, su gran duración y alta energía, ya que implican un fuerte riesgo de daño.

#### 2.4.3 Incidencia de bajo voltajes.

Otra fuente de señales, que perturban a equipos de computación, es la ocurrencia de bajos voltajes, que pueden ser causados por el arranque cercano de altas cargas o distintas fallas, que incluye la causada por descargas en la línea, debido a inducciones, producto de relámpagos. Mientras los sobrevoltajes pueden ser relativamente fáciles de suprimir o mitigar, por un aparato que desvie el exceso de energía, la disminución de energía asociada con la baja de voltaje no puede ser suplementada por un simple aparato. Diferentes métodos se necesitan para subsanar este último problema.

#### 2.4.4 Tipos de disturbios en la línea y equipos para su control.

##### Sobre y bajo voltajes.

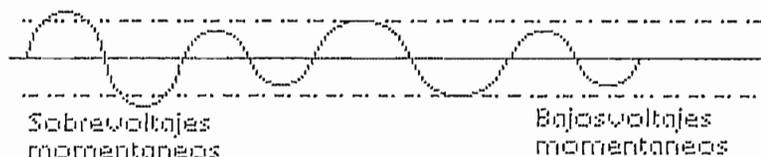


Sobrevoltajes y bajovoltajes, son condiciones de funcionamiento anormal que se caracterizan por voltajes más altos o más bajos en las líneas con duraciones de algunos segundos, éstos son causados por sobrecargas en los circuitos, regulación de voltaje muy pobre, e intencionales reducciones de voltaje.

Este tipo de fenómenos, afectan a casi la mayor parte de los equipos electrónicos, pese a que muchos equipos, están diseñados para tolerar 120 voltios  $\pm$  10 %.

Los equipos de control usados en estos casos son reguladores de voltaje, acondicionadores de línea y fuentes ininterrumpibles de potencia (UPS).

#### Bajas de voltaje (sag) y sobrevoltajes momentáneos (swell)



Las bajas momentáneas de voltaje (cuando el voltaje decrece fuera de la tolerancia normal de los equipos por unos pocos segundos) normalmente son causados por el arranque de cargas altas, (como cuando se arranca un motor) debido a relámpagos, o por fallas en el sistema de potencia. En cambio los sobrevoltajes momentáneos son breves crecimientos de voltajes, usualmente causados por decrecimiento, desconexión o apagado de equipo pesado.

Las bajas de voltaje, afectan a circuitos sensitivos de baja potencia en computadores o grandes controladores y pueden causar paros en los equipos, mientras elevaciones de voltaje pueden causar daños en los equipos (incluyendo a los equipos supresores de picos) que tienen baja tolerancia.

El equipo de protección para este tipo de fallas incluye regulador de voltaje, transformadores ferroresonantes, acondicionadores de líneas o UPSs.

## Pulsos (spikes, impulses, surges)



Los pulsos (impulsos, ruido proveniente de interruptores, ruido proveniente de relámpagos, etc) son incrementos de voltaje que duran desde los microsegundos a los milisegundos de ancho. La amplitud de éstos, van desde los 200 a los 6000 voltios y son producidos por relámpagos, conexión y desconexión de cargas pesadas y cortocircuitos o fallas en los sistemas de potencia.

Este tipo de fallas pueden destruir cualquier tipo de carga electrónica, además, pueden romper el aislamiento de motores y transformadores. La protección del equipo frente a los pulsos se realiza por medio de supresores de picos o acondicionadores de líneas.

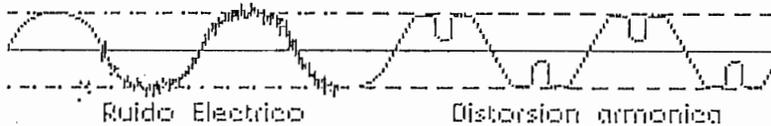
## Pérdida momentánea de potencia (outage)



Esta falla se produce debido a pérdidas de potencia que van desde milisegundos hasta algunas horas, y son causadas por fallas en el sistema de potencia, accidentes que implican a las líneas de potencia, fallas en los transformadores y fallas de tipo general. Algunos equipos sensitivos pueden verse afectados por pérdidas de potencia tan pequeñas como de 15 ms. Todo equipo se puede resultar afectado por este tipo de falla.

La forma de proteger los equipos de estas fallas es por medio de UPSs.

### Ruido eléctrico y distorsión armónica.



El ruido eléctrico, es una distorsión que afecta a las formas de onda sinusoidales de la potencia de entrada y puede ser causada por: transmisiones de radar y radio, luces fluorescentes, circuitos de sistemas de control electrónico de potencia, equipo industrial, cargas acopladas a rectificadores de estado sólido y fuentes de poder por conmutación, como aquellas que se usan en los sistemas de computación.

El ruido eléctrico, perturba equipo en base a microprocesadores, como computadores y controladores programables; mientras tanto la distorsión armónica puede causar sobrecalentamientos en motores como los que integran las unidades de disco.

Para evitar estas fallas se usan, entre otras cosas, filtros, transformadores de aislamiento, UPS o acondicionadores de línea.

#### 2.4.5 Problemas comunes en sistemas digitales y su solución.

Para computadores individuales con periféricos conectados a la misma toma o a diferentes tomas, los problemas más comunes que se presentan son: transitorios en las líneas y/o diferentes potenciales en la tierra. La solución para este sistema sería el uso de supresores de

picos y transitorios y el uso de una ventana de tierra local

Para equipo digital de interfase, con la línea de potencia o de datos (tales como facsímiles o intercomunicadores), el problema que usualmente se presenta es la diferencia de potencial en la tierra, durante descargas estáticas (surges), aún con protección individual de líneas. La solución para este problema es usar una ventana local de tierra para los equipos.

En sistemas distribuidos con terminales remotos (tales como PCs conectados a una impresora o a varios terminales unidos con una sola unidad central de proceso), los problemas que se presentan son transitorios de línea, en los cordones individuales o la operación de supresores, en cada equipo que elevan el potencial de tierra. La solución para este caso es: una ventana local de tierra en cada terminal y conexión entre los equipos por medio de fibras ópticas.

En sistemas en edificios separados, se presentan transitorios en los cordones de datos individuales y diferencias de potencial en la tierra. La forma de evitar estos problemas será por medio de puestas a tierra especiales, y el uso de fibra óptica para interconectar los equipos.

### CAPITULO 3 : SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y MECANICOS

- 3.1 Modelación de los fenómenos eléctricos, mecánicos y radiación.
- 3.2 Plantamiento del problema y parámetros fundamentales.
- 3.3 Modelación de los fenómenos eléctricos y mecánicos que afectan a un centro de cómputo.
- 3.4 Desarrollo de los programas de simulación.

### 3.1 MODELACION DE FENOMENOS ELECTRICOS, MECANICOS Y RADIACION.

#### 3.1.1 Fenómenos eléctricos.

De los fenómenos de origen eléctrico, que afectan al normal funcionamiento de un centro de cómputo, se va a modelar la descarga electrostática.

#### Modelación de la descarga electrostática

Se han desarrollado modelos, para simular el fenómeno de ESD en el sistema formado por un equipo electrónico y el cuerpo humano. El cuerpo humano o un cuerpo conductor aislado, son usualmente especificados, como fuentes portadoras de carga. Se proponen cuatro modelos para la ESD [20]:

- Modelo 1: Corresponde a la punta de un dedo y es usado para simular la descarga proveniente de un dedo.
- Modelo 2: Corresponde a un cuerpo metálico y es usado para simular la descarga, desde un objeto metálico sostenido por una persona.
- Modelo 3: Corresponde a una placa metálica y simula un evento ESD, desde una estructura conductora que puede ser movida, por rodillos o ruedas aisladas.
- Modelo 4: Corresponde a la forma de onda resonante provocada por una placa metálica y simula el transitorio de la ESD, de un objeto metálico cargado, caracterizándose por una pequeña resistencia de descarga menor que la del modelo 3.

El circuito presentado en la figura 3.1 es normalmente usado para representar una fuente de ESD. Valores típicos de los componentes para los distintos modelos, se dan en la tabla 3.1. [20]

La carga generada por el cuerpo humano, puede ser de

cualquier polaridad. Conceptos básicos para la modelación se tomarán en cuenta, para dos sistemas: un cuerpo cargado aproximándose, a un equipo sin puesta a tierra y a un equipo con puesta a tierra. En ambos casos se analizarán las respuestas quasi-estática y dinámica.

Modelo	R (Ω)	C (pF)	L (nH)
1	1500-2000	150	< 100
2	350-500	150	< 100
3	100	150	< 100
4	15	150	< 25

Tabla 3.1 Valores de los parámetros del circuito de una fuente de ESD.

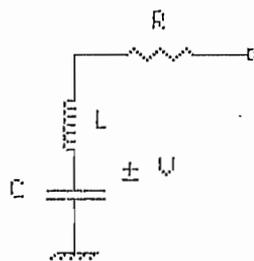


Figura 3.1 Modelo de una fuente de ESD.

### Análisis quasi-estático

Este análisis utiliza la teoría electromagnética, por medio de la cual, se generará una serie de ecuaciones, que definirán un sistema de varios cuerpos, como función de sus potenciales, cargas y coeficientes de capacitancia. Para un sistema de n cuerpos las ecuaciones son [27]:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= C_{11} \cdot V_1 + C_{12} \cdot V_2 + \dots + C_{1n} \cdot V_n \\
 Q_2 &= C_{21} \cdot V_1 + C_{22} \cdot V_2 + \dots + C_{2n} \cdot V_n \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 Q_n &= C_{n1} \cdot V_1 + C_{n2} \cdot V_2 + \dots + C_{nn} \cdot V_n
 \end{aligned}$$

[3.1]

donde:

$Q_i$  es la carga en el cuerpo  $i$  en coulombs

$V_i$  es el potencial  $i$  en voltios

$C_{ii}$  es el coeficiente de autocapacitancia en faradios

$C_{ij}$  es el coeficiente de capacitancia mutua en faradios

El coeficiente de capacitancia  $C_{ii}$ , se define como; la carga en el cuerpo  $i$ , cuando éste tiene un potencial de 1 voltio y los otros conductores del sistema están a tierra. El coeficiente de capacitancia mutua  $C_{ij}$ , se define; como la carga en el cuerpo  $i$ , cuando el cuerpo  $j$ , esta a 1 voltio y los demás conductores exceptuando el  $j$  están a tierra. Por medio del teorema de Green, se puede demostrar que  $C_{ij}=C_{ji}$  [27]. Los coeficientes de autocapacitancia son positivos, mientras que, los coeficientes de capacitancia mutua pueden ser negativos o cero, porque la carga inducida en un cuerpo, es de polaridad opuesta a la de inducción.

Los coeficientes dependen de la geometría de un sistema dado de conductores y es posible calcular para algunos tipos sencillos de arreglos de conductores. Experimentalmente, un electrómetro y una fuente estable de DC, se pueden usar para medir los coeficientes, en determinado arreglo de conductores. Los equipos electrónicos usados en grandes centros de cómputo, son de dimensiones amplias, por lo cual el riesgo de descarga electrostática se presenta cuando el objeto o persona cargado, se acerca lo suficiente a partes sensibles del equipo como para producir una descarga, de tal forma, que otro equipo cercano a éste, se puede considerar virtualmente exento de peligro. Esta consideración permite aplicar el modelo de las dos esferas, para modelar la ESD. Para el análisis de descarga, en equipos electrónicos de menor tamaño, si el arreglo de éstos no permite cálculo analítico de los coeficientes de capacitancia, es necesario medir experimentalmente estos coeficientes, con el objeto de aplicar la modelación y simulación del sistema, a través de las ecuaciones [3.1].

Modelo general de dos esferas. [20] Considérese dos esferas de radios A y B, separados por una distancia  $d$ , como se observa en la figura 3.2. La esfera 1, simula el cuerpo cargado y la esfera 2, el sistema bajo prueba. Existe la solución analítica, para obtener los coeficientes de capacitancia para éste sistema.

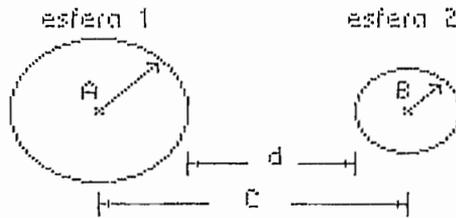


Figura 3.2 Modelo de las dos esferas.

Los coeficientes de capacitancia dependen solamente de la ubicación y forma geométrica de conductores y aisladores, las ecuaciones para su cálculo son [20]:

$$[3.2] \quad C_{11} = 4\pi\epsilon_0 AB \cdot \sinh(\alpha) \sum_{n=1}^{n=\infty} (X_n)$$

donde

$$[3.3] \quad X_n = [B \cdot \sinh(n\alpha) + A \cdot \sinh((n-1)\alpha)]^{-1}$$

$$[3.4] \quad C_{22} = 4\pi\epsilon_0 AB \cdot \sinh(\alpha) \sum_{n=1}^{n=\infty} (Y_n)$$

donde

$$[3.5] \quad Y_n = [A \cdot \sinh(n\alpha) + B \cdot \sinh((n-1)\alpha)]^{-1}$$

$$[3.6] \quad C_{12} = -4\pi\epsilon_0 AB / C \cdot \sinh(\alpha) \sum_{n=1}^{n=\infty} (Z_n)$$

donde

$$[3.7] \quad Z_n = \operatorname{csch}(n\alpha)$$

además

$$[3.8] \quad \cosh(\alpha) = (C^2 - A^2 - B^2) / 2AB = k$$

$$[3.9] \quad \alpha = \operatorname{arc} \cosh(k) = \ln \sqrt{[k + (k^2 - 1)]}$$

La energía en joules, para un sistema de n conductores es

$$[3.10] \quad E_n = \sum_{i=1}^{i=n} (\frac{1}{2} Q_i \cdot V_i)$$

Una buena aproximación para conocer en que momento se produce la ESD, se puede obtener cuando  $(V_1 - V_2)/d$  sea igual que 30 kV/cm, el campo de ruptura del aire. El aproximar el campo entre dos esferas, al que se produce entre dos placas aisladas, introducirá un error del 10 por ciento. Consideremos los campos producidos por las tres geometrías indicadas en la figura 3.3, la relación del campo  $E_1$  al  $E_0$  es:

$$[3.11] \quad E_1/E_0 = 0.9(r+d/2)/r$$

y la relación del campo  $E_2$  al  $E_0$  es:

$$[3.12] \quad E_2/E_0 = 0.9(r+d)/r$$

si  $d \ll r$   $E_1$  y  $E_2$ , serán aproximadamente iguales a  $E_0$ , y el error de tomar  $E_0$  en lugar de  $E_1$  o  $E_2$  es de:

$$(E_0 - 0.9E_0)/E_0 * 100\% = 10\%$$

como se había indicado.

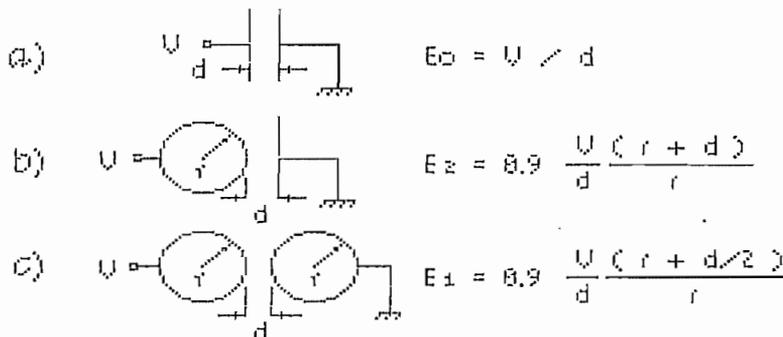


Figura 3.3 Máximos campos eléctricos para tres configuraciones a) Dos placas paralelas b) Esfera y plano c) Dos esferas de igual radio.

El caso b) en la figura 3.3, un plano y una esfera, es equivalente a dos esferas, una de las cuales tiene un radio infinito.

Caso 1: Ambos cuerpos flotantes

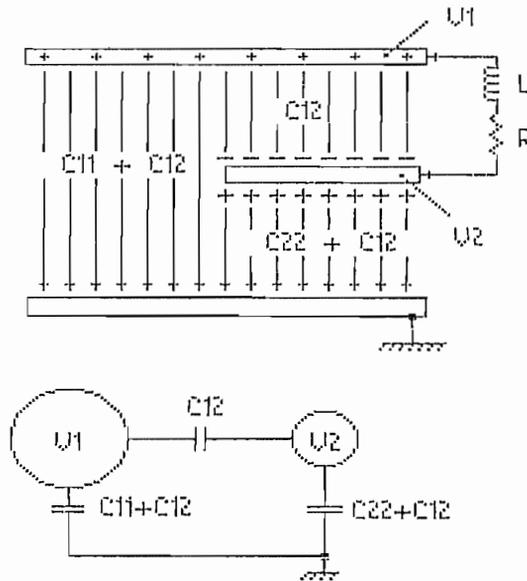


Figura 3.4 Circuitos equivalentes para el caso 1.

Este modelo, aproxima lo que sucede cuando un cuerpo cargado se acerca a un sistema electrónico sin puesta a tierra y sin carga neta. Aplicando [3.1] las ecuaciones del sistema son:

[3.13]  $C_{11} \cdot V_1 + C_{12} \cdot V_2 = Q_1$

[3.14]  $C_{21} \cdot V_1 + C_{22} \cdot V_2 = 0$

Dados la carga  $Q_1$  y los coeficientes de capacitancia  $C_{11}, C_{12}$  y  $C_{22}$ , los potenciales de los cuerpos  $V_1$  y  $V_2$ , a partir del sistema formado por [3.13] y [3.14], quedan así:

[3.15]  $V_1 = Q_1 / D_1$

y

[3.16]  $V_2 = -V_1 \cdot C_{12} / C_{22}$

donde

$$[3.17] \quad D1=C11-C12/C22$$

En este caso, la energía antes de la descarga es:

$$[3.18] \quad Ei = \frac{1}{2} \cdot Q1 \cdot V1$$

La descarga puede simularse por medio de un cortocircuito entre las dos esferas. Después de la descarga,  $Q1$ , se distribuirá sobre los dos cuerpos, que quedan a un potencial común  $V$ , el sistema [3.1] queda entonces de la siguiente manera:

$$[3.19] \quad C11 \cdot V + C12 \cdot V = Q1'$$

$$[3.20] \quad C21 \cdot V + C22 \cdot V = Q2'$$

pero  $Q1' + Q2' = Q1$  (conservación de la carga), entonces, de [3.19] y [3.20] obtenemos:

$$[3.21] \quad Q1 = (C11 + 2 \cdot C12 + C22) \cdot V$$

La autocapacitancia del cuerpo, formado por la unión de las esferas es  $C11 + 2 \cdot C12 + C22$ . La energía final del sistema es:

$$[3.22] \quad Ef = \frac{1}{2} \cdot Q1 \cdot V$$

La energía disipada en la descarga, es igual a la diferencia de la energía final menos inicial:

$$[3.23] \quad Ed = Ef - Ei$$

### Caso 2: Cuerpo 1 flotante y cuerpo 2 a tierra.

Este modelo simula un cuerpo cargado, aproximándose a un equipo con chasis de tierra. Las ecuaciones del sistema son:

$$[3.24] \quad Q1 = C11 \cdot V1$$

$$[3.25] \quad Q2 = C12 \cdot V1$$

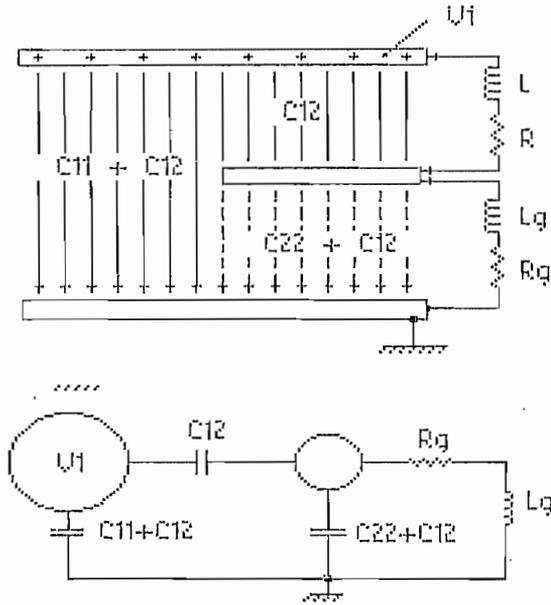


Figura 3.5 Circuitos equivalentes para el caso 2.

la energía inicial es

$$[3.26] \quad E_i = \frac{1}{2} Q_1 V_1$$

y la energía final, luego de la descarga, es cero. la figura 3.5 ilustra este caso.

### Análisis dinámico

#### Caso 1: Ambos cuerpos flotantes

El potencial que conduce a la descarga es  $V_1 - V_2$ , el momento que ésta se produce, el flujo asociado con  $C_{12}$ , en la figura 3.4, es eliminado por la descarga.  $R$  y  $L$  son las resistencias e inductancias totales en serie, para la vía de descarga.  $R_1$  y  $L_1$  están asociados con el cuerpo 1,  $R_2$  y  $L_2$  con el cuerpo 2. El circuito de la figura 3.4 para el análisis dinámico puede ser dibujado como se indica en la figura 3.6. Una solución analítica del sistema, se puede

obtener por medio de la transformada de Laplace u otro método matemático para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias.

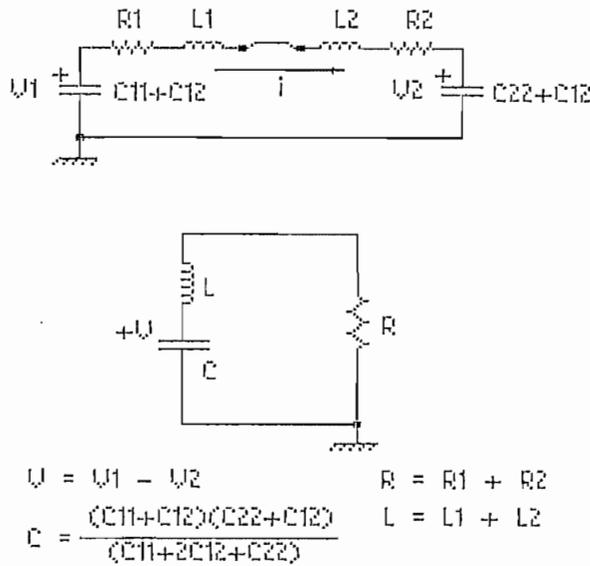


Figura 3.6 Circuitos equivalentes para el análisis dinámico del caso 1.

Si la corriente del sistema es  $I_{st}$  y el voltaje sobre los capacitores  $C_{11}+C_{12}$  y  $C_{22}+C_{12}$ , son  $V_1$  y  $V_2$  respectivamente, el comportamiento del modelo en el tiempo, estará caracterizado por el sistema de ecuaciones siguientes:

$$[3.27] \quad I_{st}' = -[V + (R_1 + R_2) I_{st}] / (L_1 + L_2)$$

$$[3.28] \quad V_1 = V_{10} - \int_0^t I_{st} \cdot d(I_{st}) / (C_{11} + C_{12})$$

$$[3.29] \quad V_2 = V_{20} + \int_0^t I_{st} \cdot d(I_{st}) / (C_{22} + C_{12})$$

Caso 2: Cuerpo 1 flotante y cuerpo 2 a tierra.

El potencial que induce la descarga es  $V_1$ . El circuito de la figura 3.5 puede ser redibujado como se indica en la figura 3.7, para el análisis dinámico.  $R_1$  y  $L_1$  están

asociadas con el cuerpo 1 y, R2 y L2 están asociadas con el cuerpo 2, además en este caso aparecen Rg y Lg que son la resistencia y la inductancia, respectivamente, del camino a tierra. Para la resolución analítica de este caso, se puede considerar que la resistencia R1+R2 es lo suficientemente grande para desprestigiar el valor de las inductancias L1+L2, y ésta se puede llevar a cabo por medio de la transformación de Laplace u otro método para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias.

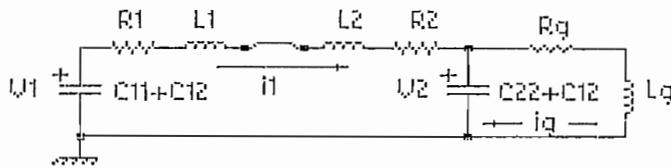


Figura 3.7 Circuito equivalente para el análisis dinámico del caso 2.

Si consideramos que: la corriente en el primer lazo es I1, la que va a tierra es Ig, el voltaje sobre el cuerpo 1 es V1 y sobre el cuerpo 2 es V2, el sistema de ecuaciones que modelan al sistema son:

$$[3.30] \quad V1' = I1 / (C11 + C12)$$

$$[3.31] \quad V2' = (I1 - I_g) / (C22 + C12)$$

$$[3.32] \quad I1' = (-V1 - V2 - R1 \cdot I1) / L1$$

$$[3.33] \quad I_g' = (V2 - R2 \cdot I_g) / L2$$

Descargas secundarias y en serie.

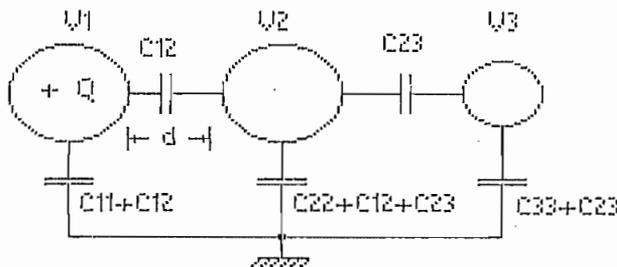


Figura 3.8 Circuito equivalente de la descarga secundaria.

El concepto de descarga secundaria y descarga en serie, para el caso de tres cuerpos conductivos, cuando uno de ellos tiene carga  $Q$  y los demás están descargados, se ilustra en base a la figura 3.8. Este modelo podría simular, una persona acercándose a dos equipos sin puesta a tierra. Por facilidad se ha considerado que no existe flujo que encadena los cuerpos 1 y 3 ( $C_{13}=C_{31}=0$ ). Aplicando [3.1], las ecuaciones del sistema son:

$$[3.34] \quad C_{11}.V_1 + C_{12}.V_2 = Q$$

$$[3.35] \quad C_{21}.V_1 + C_{22}.V_2 + C_{23}.V_3 = 0$$

$$[3.36] \quad C_{32}.V_2 + C_{33}.V_3 = 0$$

Si los cuerpos 3 y 2 son fijos y el cuerpo 1 se mueve hacia ellos, sus potenciales, puede ser calculado para cualquier separación  $d$ , usando los coeficientes de capacitancia medidos o calculados. Mientras  $d$  decrece, dos situaciones pueden ocurrir:

- a) Que  $V_1 - V_2$  exceda el campo de ruptura y la primera descarga se produzca entre el cuerpo 1 y el cuerpo 2, en este caso, el flujo asociado con  $C_{12}$ , es eliminado. La descarga puede ser modelada por un conductor fino uniendo estos cuerpos. Después de la descarga, el sistema queda como se indica en la figura 3.9. Las ecuaciones del sistema, aplicando [3.1], son:

$$[3.37] \quad C_{22}'.V_2' + C_{23}.V_3 = Q_1$$

$$[3.38] \quad C_{32}'.V_2' + C_{33}.V_3 = 0$$

El potencial  $V_2' - V_3$  puede entonces exceder el campo de ruptura, nuevamente, y producirse la segunda descarga.

- b) Si el medio entre el cuerpo 1 y el cuerpo 2 es suficientemente dieléctrico, posiblemente no se produzca la primera descarga. Sin embargo aplicando

las ecuaciones [3.34] - [3.36], la diferencia de potencial ( $V_2 - V_3$ ) puede exceder el campo de ruptura del medio, entre el cuerpo 2 y 3 produciéndose una descarga en serie.

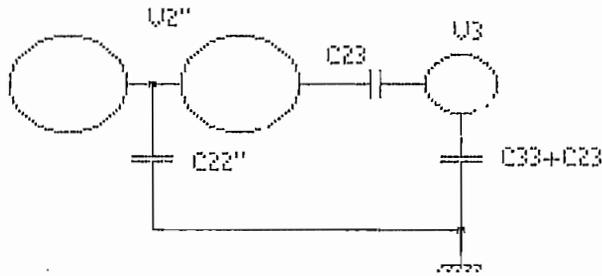


Figura 3.9 Modelo para la descarga en el caso a)

Este análisis asume que la primera descarga es mucho anterior a la iniciación de la segunda descarga. Sin embargo esto permite una estimación de corriente de la segunda descarga. La segunda descarga se considera fuera del alcance de esta tesis.

#### Modelo generalizado. [20]

Un modelo más completo de un sistema electrónico podemos ver en la figura 3.10. El módulo del circuito esta contenido en un chasis semiconductor. Los componentes de éste modelo son los siguientes:

- C2: capacitancia a tierra del chasis
- Rg: resistencia del cable a tierra del chasis
- Lg: inductancia del cable a tierra del chasis
- Zsg: impedancia del plano de tierra de la señal
- C4: capacitancia entre el chasis y el cable de señal
- C3: capacitancia entre el chasis y la tierra de la señal
- C5: impedancia del cable de señal interno a tierra
- C6: capacitancia a tierra del cable de entrada/salida
- Zl: impedancia para limitar la corriente de descarga sobre el cable de señal

$Z_p$ : shunt para limitar el voltaje entre la tierra y el cable de señal

$R_1$ ,  $L_1$  y  $C_1$  representan: resistencia, inductancia y capacitancia, respectivamente, de la fuente de ESD. Como se ha visto, por medio del modelo de las esferas, el potencial del chasis de un equipo electrónico, cambia debido a la presencia de un cuerpo cargado, de tal manera que si la tierra del circuito no se conecta al chasis, ocurrirá una división de voltaje, entre la circuitería interna y el chasis, debido a  $C_4$  y  $C_5$ . Este problema se verá salvado con

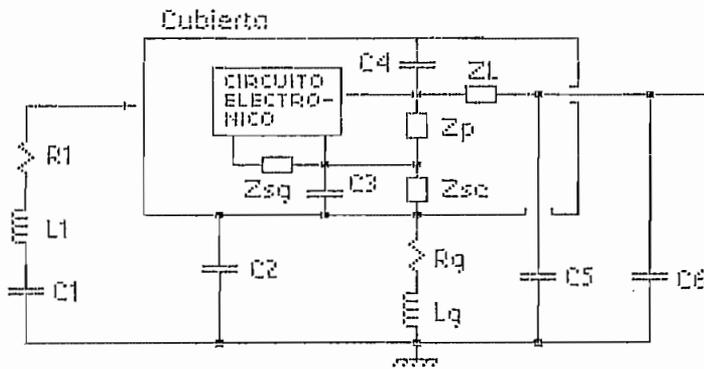


Figura 3.10 Modelo general para un equipo electrónico.

la presencia de un cable de baja impedancia, como  $Z_{sc}$ , entre la tierra de la señal y el chasis. Para evitar, que equipos externos se acoplen al sistema por medio de  $C_5$ , puede usarse una extensión del plano de tierra interno, para acorazar el cable de señal, o se colocará una jaula de Faraday alrededor de elementos sensibles del circuito.

### 3.1.2 Fenómenos mecánicos.

#### Modelo mecánico de un equipo electrónico.

El modelo completo de un equipo electrónico, para el análisis de los efectos vibratorios en éste, deberá

considerar varios factores, entre los que podemos citar:

- La masa del equipo no está concentrada en un solo punto, se encuentra distribuída en diferentes partes del mismo. Por ejemplo, una tarjeta que contenga entre sus circuitos, un transformador pesará más que otra, (aunque ambas tengan la misma forma y dimensiones) que contenga solo circuitos integrados y elementos discretos.
- Las tarjetas electrónicas, que se deben considerar como placas vibrantes, cuya elasticidad depende de su contextura y dimensiones, pueden tener diferentes comportamientos mecánicos. Aunque dos tarjetas sean físicamente idénticas pueden variar en su estructura. Esto ilustra la figura 3.11.
- Algunas partes del equipo pueden tener tendencia a generar fuerzas de torsión y/o vibración en más de una dimensión.

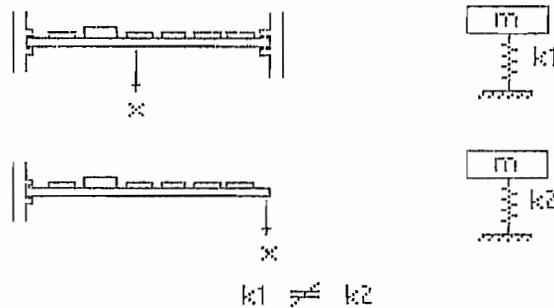


Figura 3.11 Los coeficientes de elasticidad varían con la forma geométrica y las dimensiones de las tarjetas.

- Mientras más grandes son las dimensiones de un equipo, la vibración entre soporte y soporte, será diferente y en el mejor de los casos igual (considerese como soporte las partes que hacen contacto entre el equipo y el suelo), debido al amortiguamiento que va sufriendo la onda vibratoria, conforme avanza a través del piso.
- La forma de onda de vibración sobre el equipo generalmente no será sinusoidal, y en el mejor de los casos podría esperarse que sea periódica.

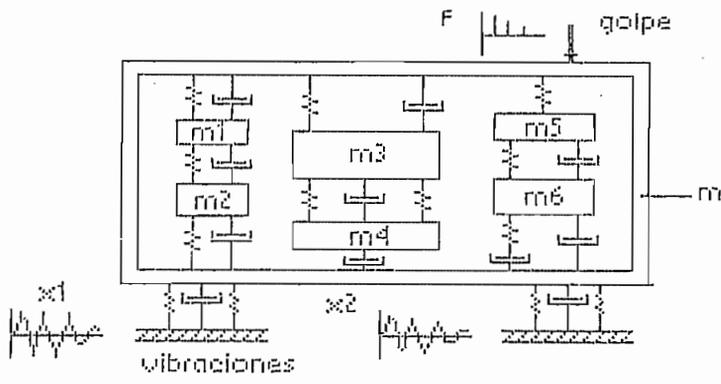


Figura 3.12 Modelo general de un equipo electrónico

Tomando en cuenta estas acotaciones, un modelo que se acerca mucho al modelo mecánico de un equipo electrónico ante vibraciones, estará conformado según indica la figura 3.12. En este modelo, que presenta algunos grados de libertad, es virtualmente imposible o muy difícil, medir o determinar el valor de los parámetros que lo conforman, ya que, si el fabricante no proporciona estos valores, implicaría la necesidad de desarmar al equipo para determinar pesos y coeficientes de amortiguamiento y elasticidad.

Si para el modelo general consideramos que:

- La masa del equipo se encuentra concentrada en un punto y cuyo valor es igual al dado por el fabricante.
- Se desprecia el amortiguamiento que puede causar el piso entre los soportes del equipo, más no entre el lugar donde se produce la vibración y el equipo bajo prueba.
- Las formas de onda de vibración se consideran sinusoidales, (considérese que una forma de onda periódica, por medio de las series de Fourier, puede ser expresada como la suma de componentes sinusoidales).

éste se reducirá al modelo indicado por la figura 3.13, donde  $k$ ,  $c$  y  $M$  son parámetros propios de la máquina,  $m$  es la masa

del alojamiento además  $c_1$  y  $k_1$  son los coeficientes de amortiguamiento y elasticidad de los soportes, los que incluirán las protecciones que se coloquen al equipo para aislarlo de vibraciones procedentes del suelo.

El golpe desde el punto de vista mecánico es considerado como una fuerza pulso [28] aplicada en un punto, de manera que este modelo, será útil para el análisis de golpe y vibración.

### Análisis matemático del modelo

El análisis matemático del modelo, supone que el equipo está sometido a la acción de una onda vibratoria sinusoidal amortiguada y a la presencia de golpes como podemos observar en la figura 3.14.

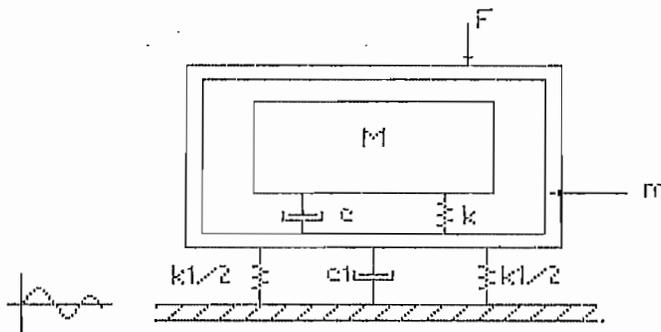


Figura 3.13 Modelo mecánico aproximado de un equipo electrónico.

La forma de onda que tiene la vibración es:

$$[3.39] \quad Y_0 = A \cdot \cos(\omega t - \phi)$$

donde

$$[3.40] \quad A = K \cdot e^{-D \cdot t}$$

$D$  es el coeficiente de amortiguamiento del piso, función de las características de los pisos en cada local,  $\phi$  es el

ángulo de desfase de la onda de vibración.

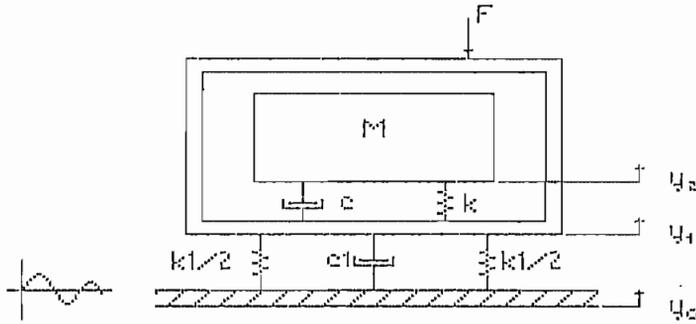


Figura 3.14 Entradas y salidas del sistema.

Las ecuaciones que caracterizan al modelo son:

$$[3.41] \quad My_2'' + c.(y_2' - y_1') + k.(y_2 - y_1) = 0$$

$$[3.42] \quad c_1.(y_1' - y_0') + k_1.(y_1 - y_0) = F$$

Desarrollando [3.41] y [3.42] obtenemos las ecuaciones:

$$[3.43] \quad y_1' = (F_1 - k_1.y_1) / c_1$$

$$[3.44] \quad y_2' = y_1$$

$$[3.45] \quad y_2'' = -(c.y_2' - c.y_1' + k.y_2 - k.y_1) / M$$

donde

$$[3.46] \quad F_1 = F + c_1.y_0' + k_1.y_0$$

$$[3.47] \quad y_0' = -A.[w.\text{sen}(wt - \phi) + D.\text{cos}(wt - \phi)]$$

La fuerza está dada por la expresión:

$$[3.48] \quad F = F_m.\delta(t)$$

### Modelación del sensor de vibración.

El transductor de aceleración que en la actualidad es ampliamente usado como detector de vibración, está formado por cristales piezoeléctricos. Cuando el material piezoeléctrico, es sujeto a una aceleración, la fuerza generada por la masa sísmica o inercial es transformada a una señal de carga o potencial. En un sistema compuesto, por varios cristales piezoeléctricos en paralelo, como indica la figura 3.15, la impedancia se reduce en un factor  $n$ , que representa el número de elementos piezoeléctricos en pila, y la carga generada por éstos es:

$$[3.49] \quad Q = n \cdot d_{33} \cdot M \cdot a$$

donde  $M$  es la masa sísmica y  $a$  la aceleración.

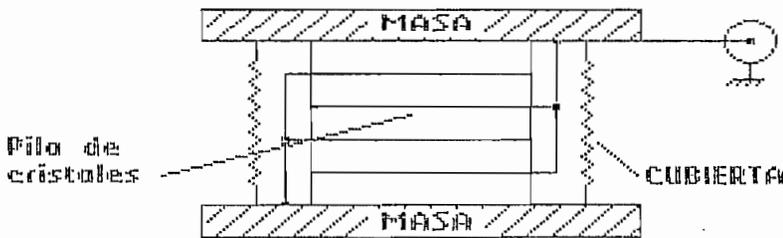


Figura 3.15 Pila de cristales a presión para un acelerómetro con capas de discos opuestamente polarizados.

El dispositivo piezoeléctrico se comporta como un condensador, al recibir presión entre sus caras, generando un voltaje dado por:

$$[3.50] \quad V = Qt / \epsilon_{33} A$$

$Q$  está definido por la ecuación [3.49],  $\epsilon_{33}$  es el coeficiente de permitividad del material,  $t$  es el espesor del cristal y  $A$  el área de la cara de éste.

La relación dinámica para el dispositivo piezoeléctrico es:

$$[3.51] \quad \frac{V(s)}{a(s)} = \frac{K \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{donde, } K = n.M.t.d_{33} / \epsilon_{33} .A$$

Valores de los parámetros  $\epsilon_{33}$  y  $d_{33}$  conocidos como propiedades elastoeléctricas, para diferentes materiales, las podemos hallar en la tabla 3.2.

Material	densidad (kg/m <sup>3</sup> )	$\epsilon_{33}$ (veces $\epsilon_0$ )	$d_{33} \times 10^{-12}$ (C/N)
Cuarzo	2649	4.68	2.31
Sal de Rochelle	1767	205	345
KDP	2338	21	21
ADP	1800	15.4	48
EDT	1538	5.25	2.2
Tourmalina	3100	7.5	1.8
ZnS	4088	8.37	3.18
ZNSe	5262	9.12	1.10
ZnTe	5636	10.1	0.91
CdTe	5840	9.65	1.68
BeO	3009	7.66	0.24
PbTi		600	44
Vernitron PZT-5H		3400	593

Tabla 3.2 Propiedades elastoeléctricas de diferentes materiales.

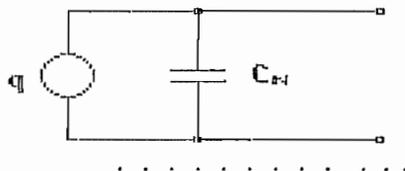


Figura 3.16 Circuito equivalente con fuente de carga.

El valor de  $\omega_n$  es igual a  $2\pi f_n$ , y el valor de  $f_n$  está entre 10 y 100 kHz, mientras el valor de  $\zeta$ , es aproximadamente igual a 0.01 [38].

El circuito equivalente de un acelerómetro, consta de una fuente de voltaje o de corriente, como indican las figuras 3.16 y 3.17, junto a un condensador en paralelo.

El circuito de un acelerómetro consta del sensor unido a un cable que conduce la señal y un aparato registrador, como indica la figura 3.18.

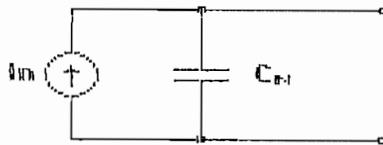


Figura 3.17 Circuito equivalente del acelerómetro con fuente de corriente.

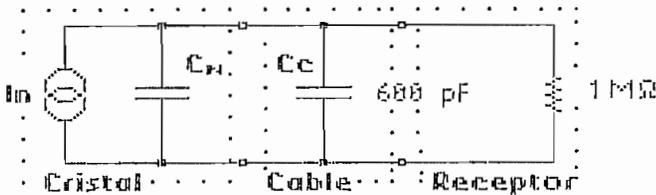


Figura 3.18 Circuito de un acelerómetro.

### 3.1.3 Radiación ionizante.

Se conoce como radiación ionizante; la radiación con suficiente energía para separar los electrones de los átomos. Como se indicó en el punto 2.2.2 del capítulo 2, los elementos más sensibles a destrucción debido a radiaciones son los elementos semiconductores, por lo tanto el modelo de un equipo electrónico frente a las radiaciones partirá de las

ecuaciones del transistor.

### Modelación de las características de un transistor MOS [32]

El punto de partida, para la modelación del transistor, son las ecuaciones de este:

para la región lineal:

$$[3.53] \quad I_D = \beta \cdot (V_{GS} - V_{TS} - \frac{1}{2}V_{DS}) \cdot V_{DS}$$

para la región de saturación:

$$[3.54] \quad I_D = I_{SAT} = \beta \cdot (V_{GS} - V_{TS} - \frac{1}{2}V_{DS}) \cdot V_{DSAT}$$

además:

$$[3.55] \quad V_{DSAT} = V_{GS} - V_{TS}$$

$$[3.56] \quad \beta = 2 \cdot k \cdot W/L$$

$$[3.57] \quad V_{TS} = V_{TO} + \gamma \cdot [(V_{SB} + \phi)^{1/2} - \phi^{1/2}]$$

Las ecuaciones de la [3.53] a la [3.57] mantienen la continuidad de la corriente de drenaje  $I_D$  y de la conductancia  $\delta I_D / \delta V_{DS}$ , en la transición de la parte lineal a la saturación, pero la última se desvanece en la región de saturación. Para evitar esta inconveniencia multiplicamos  $I_D$  por el factor de modulación que tiene la forma:

$$[3.58] \quad 1 + \lambda \cdot V_{DS}$$

el cual obliga que la conductancia sea diferente de cero en la región de saturación, pero introduce un acortamiento ficticio del canal en la región lineal. Una mejor corrección se obtendrá usando para  $I_D$  la ecuación:

$$[3.59] \quad I_D = I_{DSAT} [1 + \lambda \cdot (V_{DS} - V_{DSAT})]$$

en lugar de la ecuación [3.55] y para el voltaje de saturación tenemos:

$$[3.60] \quad V_{DSAT} = V_{GT} + [1 - (1 + \lambda^2 V_{GT}^2)] / \lambda$$

donde

$$[3.61] \quad V_{GT} = V_{GS} - V_{TS}$$

$$[3.62] \quad \lambda = \lambda_2 / (L(1 + \lambda_1 \cdot V_{GT}))$$

Los parámetros  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son independientes de la geometría. Hasta este momento, las ecuaciones originales han sido transformadas para incluir la modulación del canal, ahora éstas varían para tomar en cuenta la degradación de la movilidad.

Modelar la degradación de la movilidad significa hacer al parámetro  $k$  una función decreciente de  $V_{GT}$  para tomar en cuenta que  $I_{DSAT}$  no se incrementa tan rápidamente como  $V_{GT}$ . Por lo tanto tenemos que:

$$[3.63] \quad k = k_s / (1 + \theta \cdot V_{GT})$$

donde  $\theta$  es un parámetro empírico, el cual se incrementa mientras la longitud del canal decrece. Se propone que este parámetro sea considerado como

$$[3.64] \quad \theta = \theta_1 + \theta_2 / L$$

Resumiendo, las ecuaciones del MOS quedarían así:

En la región lineal ( $0 < V_{DS} < V_{DSAT}$ )

$$[3.65] \quad I_D = \beta \cdot V_{DS} \cdot (V_{GT} - \frac{1}{2} \cdot V_{DS})$$

En la región de saturación:

$$[3.66] \quad I_D = \beta \cdot V_{DSAT} [1 + \lambda \cdot (V_{DS} - V_{DSAT})] (V_{GT} - \frac{1}{2} \cdot V_{DSAT})$$

y además:

$$[3.67] \quad \beta = 2 \cdot k_s \cdot (W/L) \cdot [1 + (\theta_1 + \theta_2 / L) \cdot V_{GT}]$$

$$\begin{aligned}
[3.68] \quad V_{DSAT} &= V_{GT} + [1 - (1 + \lambda^2 V_{GT}^2)^{-1/2}] / \lambda \\
[3.69] \quad \lambda &= \lambda_2 / [L(1 + \lambda_1 \cdot V_{GT})] \\
[3.70] \quad V_{GT} &= V_{GS} - V_{TS} \\
[3.71] \quad V_{TS} &= V_{T0} + \gamma \cdot [(V_{SB} + \phi)^{1/2} - \phi^{1/2}]
\end{aligned}$$

En el modelo se especifican ocho parámetros empíricos de ajuste:  $k_s$ ,  $V_{T0}$ ,  $\gamma$ ,  $\phi$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , y los demás parámetros corresponden a:

$V_{TS}$	voltaje umbral
$L$	longitud del canal en el transistor
$W$	ancho del canal
$V_{GS}$	voltaje compuerta-fuente
$V_{GD}$	voltaje compuerta-drenaje
$V_{DS}$	voltaje drenaje-fuente
$I_D$	corriente de drenaje
$V_{SB}$	voltaje fuente-sustrato

Los dispositivos en un circuito integrado pueden ser de canal N, canal P o CMOS (canal N y P complementarios). El material de arranque en la fabricación de estos transistores, es un cristal de orientación  $\langle 100 \rangle$  y resistividad 7-10  $\Omega \cdot \text{cm}$  y el espesor del óxido de la compuerta es de  $1070 \pm 20 \text{ \AA}$ . Valores típicos de los parámetros indicados en las ecuaciones anteriores se indican en la tabla 3.3.

### Variación de los parámetros de un transistor por incidencia de radiación [1]

Como se indico en el punto 2.2, la incidencia de radiación sobre un dispositivo, afectará el valor de  $V_{TS}$  (o  $V_T$ ). En los transistores de canal N el voltaje umbral bajará, para el caso de  $W/L=1/7$  se ha encontrado una variación de  $V_{T\text{Inicial}}=1.65$  a  $V_{T\text{Final}}=1.48$  con 1000 Rad(Si). La figura 3.19 indica la variación de  $V_T$  vs. dosis y la figura 3.20 la curva  $\Delta V_T$  vs. dosis para un dispositivo de canal N.

W/L	1/7	1/7	10/1	7/10	10/1
$V_{SB}$ (V)	5	5	5	5	1.5
W ( $\mu\text{m}$ )	10	10	100	14	100
L ( $\mu\text{m}$ )	70	70	10	20	10
$V_{T0}$ (V)	0.56	0.29	0.22	0.25	0.22
ks ( $\mu\text{A}/\text{V}^2$ )	15.40	14.3	15.4	13.79	15.4
$\gamma$ (V <sup>1/2</sup> )	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
$\phi$ (V)	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
$\lambda_1$ (V <sup>-1</sup> )	0.08	0.08	0.74	0.24	0.74
$\lambda_2$ ( $\mu\text{m}/\text{V}$ )	0.17	0.17	0.53	0.53	0.53
$\theta_1$ (V <sup>-1</sup> )	0.0285	0.0285	0.111	0.0140	0.111
$\theta_2$ ( $\mu\text{m}/\text{V}$ )	0	0	0	0.59	0

Tabla 3.3 Parámetros de transistores.

Las figuras 3.21 y 3.22 ilustran, las relaciones antes mencionadas, para un dispositivo de canal P. Las curvas 3.23 y 3.24 visulizan las características  $\Delta I_{ss}$  (corriente consumida por el dispositivo en estado estable) vs. dosis y  $\Delta T_{pd}$  (tiempo de propagación) vs. dosis para tres diferentes tecnologías: LSI, MSI y SSI. Las figuras 3.25 y 3.26 representan las mismas funciones anteriores para un flujo de neutrones y un dispositivo en particular: la memoria RAM de 256 bits MM54C200D/RH.

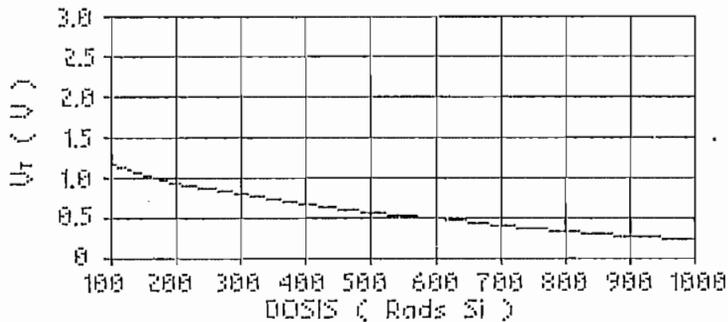


Figura 3.19  $V_r$  vs. dosis para un transistor de canal n.

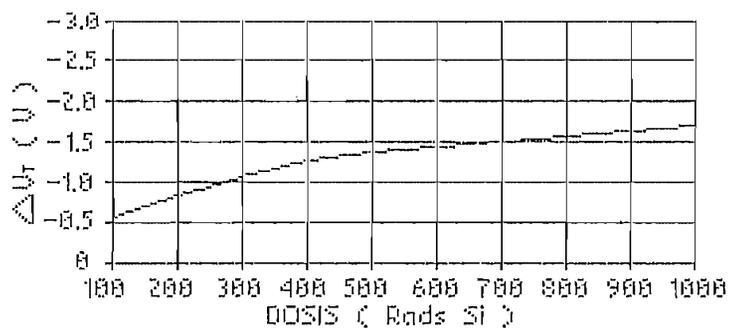


Figura 3.20  $\Delta V_T$  vs. dosis para un transistor de canal n.

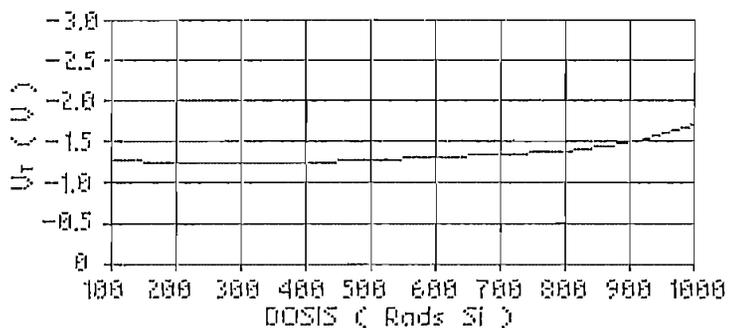


Figura 3.21  $V_T$  vs. dosis para un transistor de canal p.

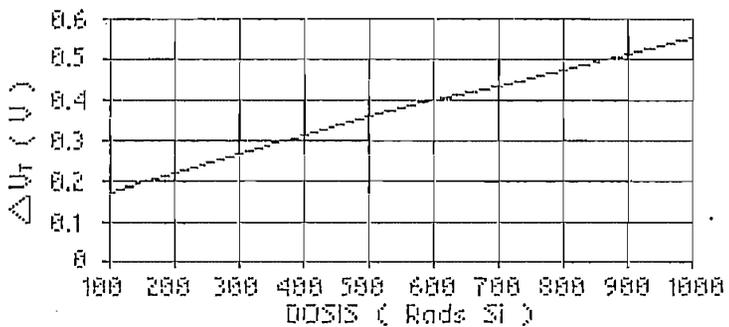


Figura 3.22  $\Delta V_T$  vs. dosis para un transistor de canal p.

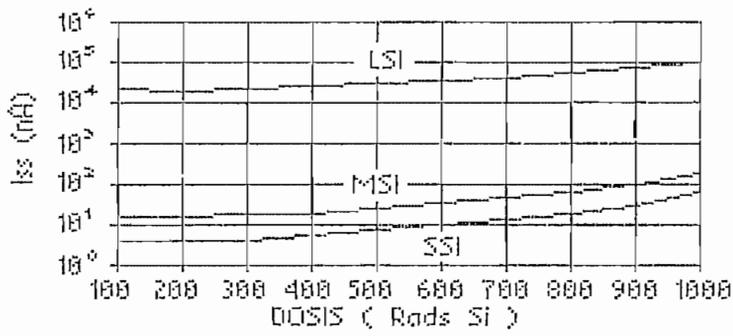


Figura 3.23  $I_{ss}$  vs. dosis

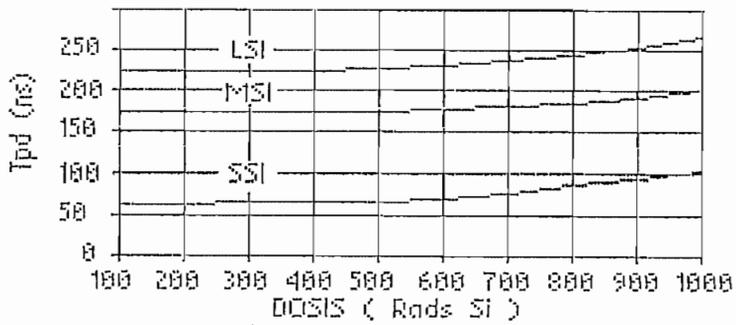


Figura 3.24  $T_{pd}$  vs. dosis

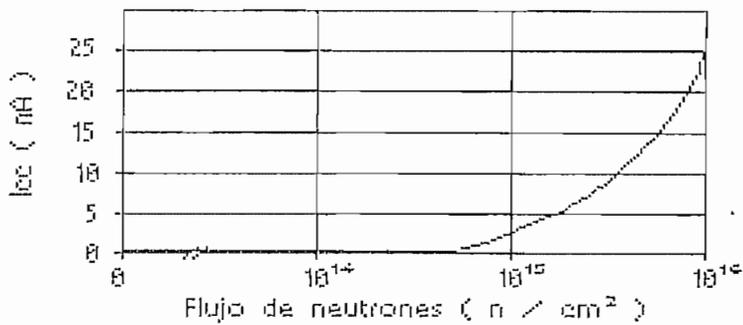


Figura 3.25  $I_{ss}$  vs. flujo de neutrones

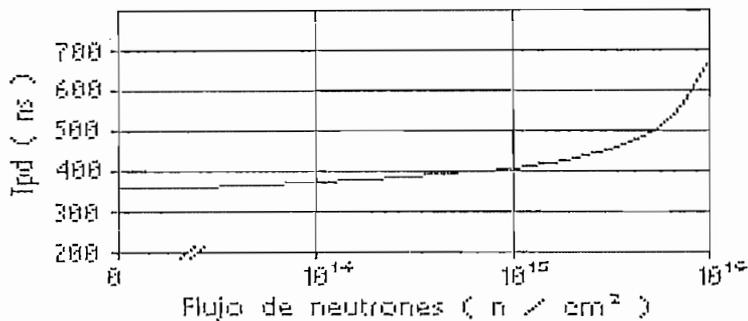


Figura 3.26  $T_{pd}$  vs. flujo de neutrones

Influencia de paredes del local y cubierta de los equipos en el nivel de radiación.

El blindaje del lugar donde se encuentra el equipo electrónico, si existe, es un factor determinante de la cantidad de radiación que está afectando a un componente del mismo. La radiación que incide sobre un material, como función de la densidad de éste, puede resultar atenuada o mejor aún, eliminada totalmente. La atenuación de un medio a flujos de radiación depende de factores como: características del material, tipo de radiación, ángulo de incidencia de la radiación, energía de la radiación incidente, etc. Para la presente modelación y simulación supondremos que las condiciones de la fuente de radiación ionizante, permiten que la radiación incida perpendicular a la pared del local, donde se encuentra el equipo. Si el medio por el cual la radiación está atravesando es homogéneo y el haz de radiación angosto, la atenuación a una intensidad de radiación  $I_0$  depende del coeficiente de atenuación  $\mu$  de acuerdo a la ecuación:

$$[3.72] \quad I(t) = I_0 \cdot e^{(-\mu t)}$$

Para situaciones más complicadas, la atenuación es aún básicamente exponencial, pero es modificada por otros factores, cuyo análisis está lejos del alcance de la presente

tesis, por lo tanto cabe señalar que para ciertas fuentes de radiación y para determinados materiales, se disponen de curvas características experimentales [37] que relacionan la cantidad de energía transmitida a través de un medio respecto al espesor de éste.

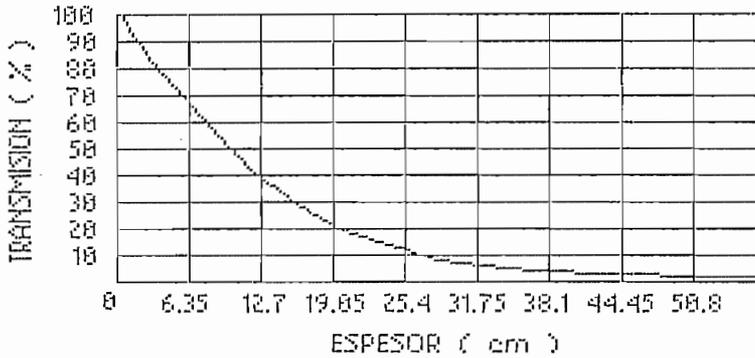


Figura 3.27 Curvas de porcentaje de radiación transmitida vs. espesor para placas de concreto de densidad  $2.35 \text{ g/cm}^3$ .

Las gráficas 3.27 a 3.29 visualizan esta relación para concreto, plomo y polietileno, si las radiaciones procedentes de una fuente de Cobalto 60 ingresan con un ángulo de  $0^\circ$ .

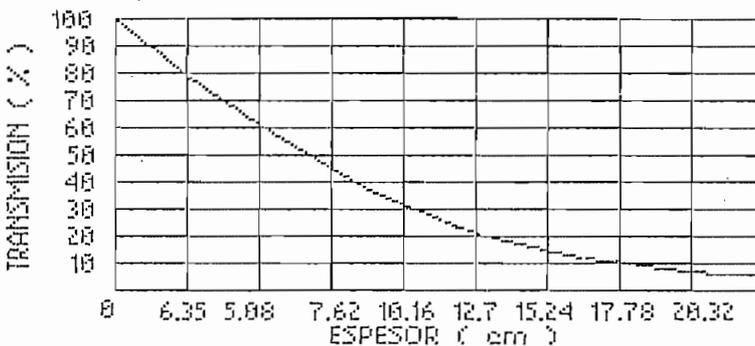


Figura 3.28 Curvas de porcentaje de radiación transmitida vs. espesor para placas de plomo

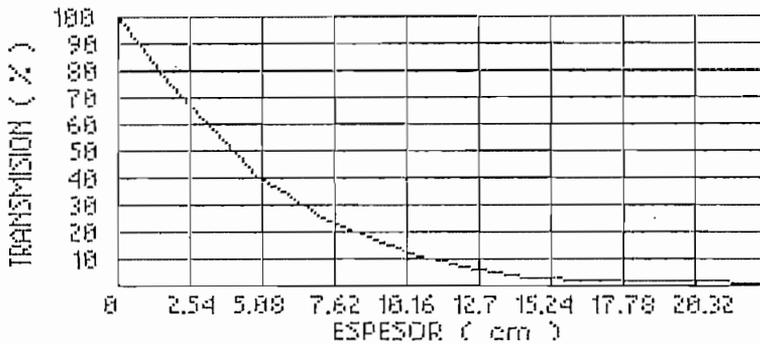


Figura 3.29 Curvas de porcentaje de radiación transmitida vs. espesor para placas de polietileno de densidad 0.92 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El problema que plantea la presente tesis, es la simulación de fenómenos eléctricos, mecánicos y la radiación ionizante que afecta al normal funcionamiento de los equipos electrónicos en un centro de cómputo.

En primer lugar se creará, o en su defecto se aplicará, un modelo matemático, adecuado para evaluar el comportamiento del equipo. Estos modelos servirán como punto de partida para realizar un programa de computador utilizando el lenguaje de simulación PROFESSIONAL DYNAMO PLUS.

Para el análisis de los diferentes fenómenos se fija la atención en ciertos parámetros, que caracterizarán la respuesta del equipo ante éstos.

En el caso de los fenómenos eléctricos la modelación se aplicará a la descarga electrostática. Para la misma se realizará modelación y simulación de los estados quasi-estático y dinámico.

La simulación del modelo para el estado quasi-estático nos permitirá observar:

- Los niveles de voltaje del equipo y del cuerpo cargado antes y después de la descarga
- La distancia crítica, para que se produzca la descarga
- La variación de las capacitancias propias del equipo y del cuerpo cargado, así como la capacitancia cuerpo - equipo en función de la distancia equipo - cuerpo cargado, y
- La energía antes y después de la descarga, así como la energía disipada por la misma.

Los parámetros de interés en este modelo son: voltajes, capacitancias, distancia y energía.

La simulación del modelo para el estado dinámico nos permitirá observar:

- La forma de la respuesta (la forma de onda) del voltaje sobre el equipo y sobre el cuerpo, y
- La forma de la respuesta (la forma de onda) de la corriente en las partes de interés, que presenta el modelo.

En el presente modelo los parámetros importantes son: voltajes y corrientes.

La simulación del comportamiento de los componentes del sistema electrónico ante la radiación, nos permitirá observar:

- El cambio de las curvas características de un transistor debido a la presencia de la radiación en el centro de cómputo, y
- El comportamiento de la radiación en el medio debido

a: paredes del local, cubiertas de los equipos y blindajes, frente a la radiación incidente.

en este caso los parámetros de interés son: curvas características del transistor y niveles de radiación.

Finalmente, de los fenómenos mecánicos se modelarán y simularán dos: el golpe y la vibración. El modelo será el mismo para ambos casos, cambiando únicamente la excitación al sistema. Lo que se observará en este modelo es:

- Forma de respuesta de velocidad de la cubierta
- La forma de respuesta del desplazamiento de la cubierta.
- Forma de respuesta de velocidad, desplazamiento y aceleración de en el interior del equipo, y
- Respuesta de un sensor piezoeléctrico de aceleración, colocado en el interior del equipo.

Consecuentemente, los parámetros importantes son: desplazamientos, velocidades y aceleraciones, así como el voltaje, generado por el sensor piezoeléctrico de aceleración.

Los modelos serán lo más generales posibles, de manera que se abarquen el mayor número de casos.

### **3.3 MODELACION DE LOS FENOMENOS ELECTRICOS, MECANICOS Y RADIACION QUE AFECTAN A UN CENTRO DE COMPUTO.**

Las ecuaciones que rigen el comportamiento de los equipos de un centro de cómputo, básicamente son las mismas que se desarrollaron en el numeral 3.1, la diferencia entre aplicar las ecuaciones a un teléfono electrónico y un equipo de un centro de cómputo radica en que los parámetros para cada uno de los casos son diferentes.

De este modo las ecuaciones a usarse son:

1) En la simulación del comportamiento del sistema equipo - cuerpo cargado:

a) Para el estado quasi-estable las ecuaciones a usarse son de la [3.13] a [3.26].

b) Para el estado dinámico las ecuaciones a usarse son de la [3.27] a la [3.33].

2) En la simulación del comportamiento del sistema equipo - golpe o vibración:

Las ecuaciones a usarse son de la [3.39] a la [3.50]

3) En la simulación del comportamiento del sistema equipo - radiación:

Las ecuaciones a usarse son desde la [3.65] a la [3.71], incluyendo las curvas indicadas en las figuras 3.22, 3.27, 3.28 y 3.29.

El cálculo de los coeficientes de capacitancia se realiza con un programa para el efecto, éste se ha realizado en el lenguaje multipropósito, haciendo uso de las ecuaciones desde la [3.2] a la [3.9].

El cálculo del radio de la esfera, que representa al equipo electrónico, se hará considerando que la superficie total de la esfera será equivalente a la superficie total del equipo bajo prueba [20]:

$$4\pi R_{\text{esfera}}^2 = S_{\text{total del cuerpo}}$$
$$[3.80] \quad R_{\text{esfera}} = \sqrt{(S_{\text{total del cuerpo}} / 4\pi)}$$

Para el cálculo del radio de la esfera equivalente al cuerpo humano supondremos que el mismo es similar a una cilindro de altura  $h$  y radio  $r$ , por lo que:

$$S_{\text{persona}} = 2\pi r(h+r) = 4\pi R_{\text{esfera}}^2$$

$$R_{\text{esfera}} = \sqrt{[\frac{1}{2}r(h+r)]}$$



Figura 3.30 Parámetros para hallar la esfera equivalente al cuerpo humano.

para los datos indicados en la figura 3.30, este radio vale:

$$R_{\text{esfera}} = \sqrt{[0.5*0.2*(1.6+0.2)]} = 0.4242 \text{ m.}$$

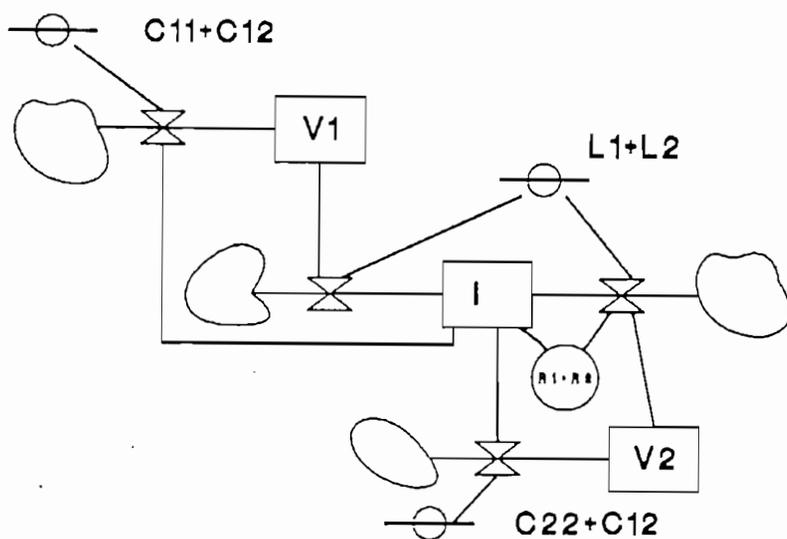
Los diagramas de Forrester para la simulación de los modelos que hacen uso de variables de nivel se presentan en la figuras 3.31 y 3.32 [40].

### 3.4 DESARROLLO DE LOS PROGRAMAS DE SIMULACION

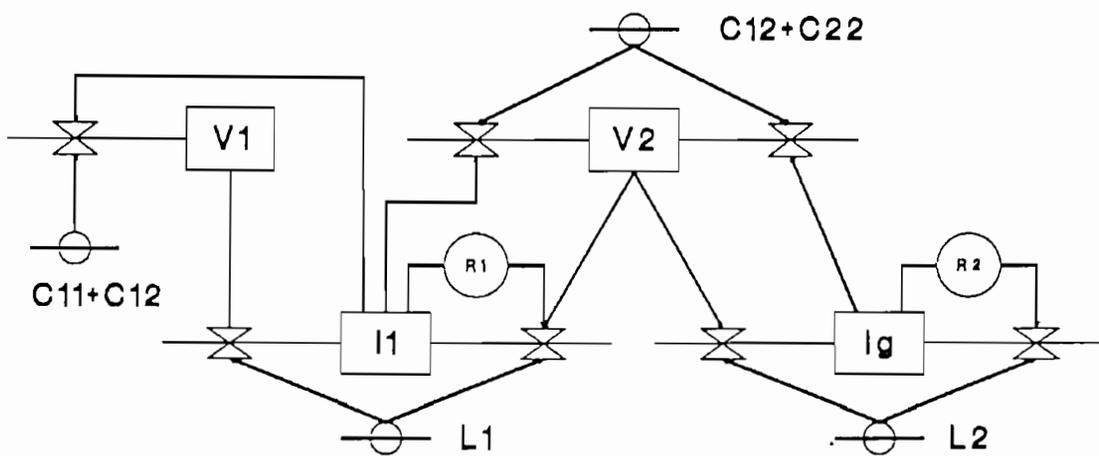
#### 3.4.1 Estructura principal de los programas.

El programa de simulación usa las facilidades que nos presenta el lenguaje de simulación PROFESSIONAL DYNAMO PLUS.

Este paquete consta de 4 bloques bien definidos: editor, compilador, simulador y presentador de resultados. Los programas realizados estan ya editados y compilados de manera que lo único que nos interesa son el simulador y la presentación de resultados.



a) Diagrama para el caso 1



b) Diagrama para el caso 2

Figura 3.31 Diagramas de Forrester para los programas sobre ESD.

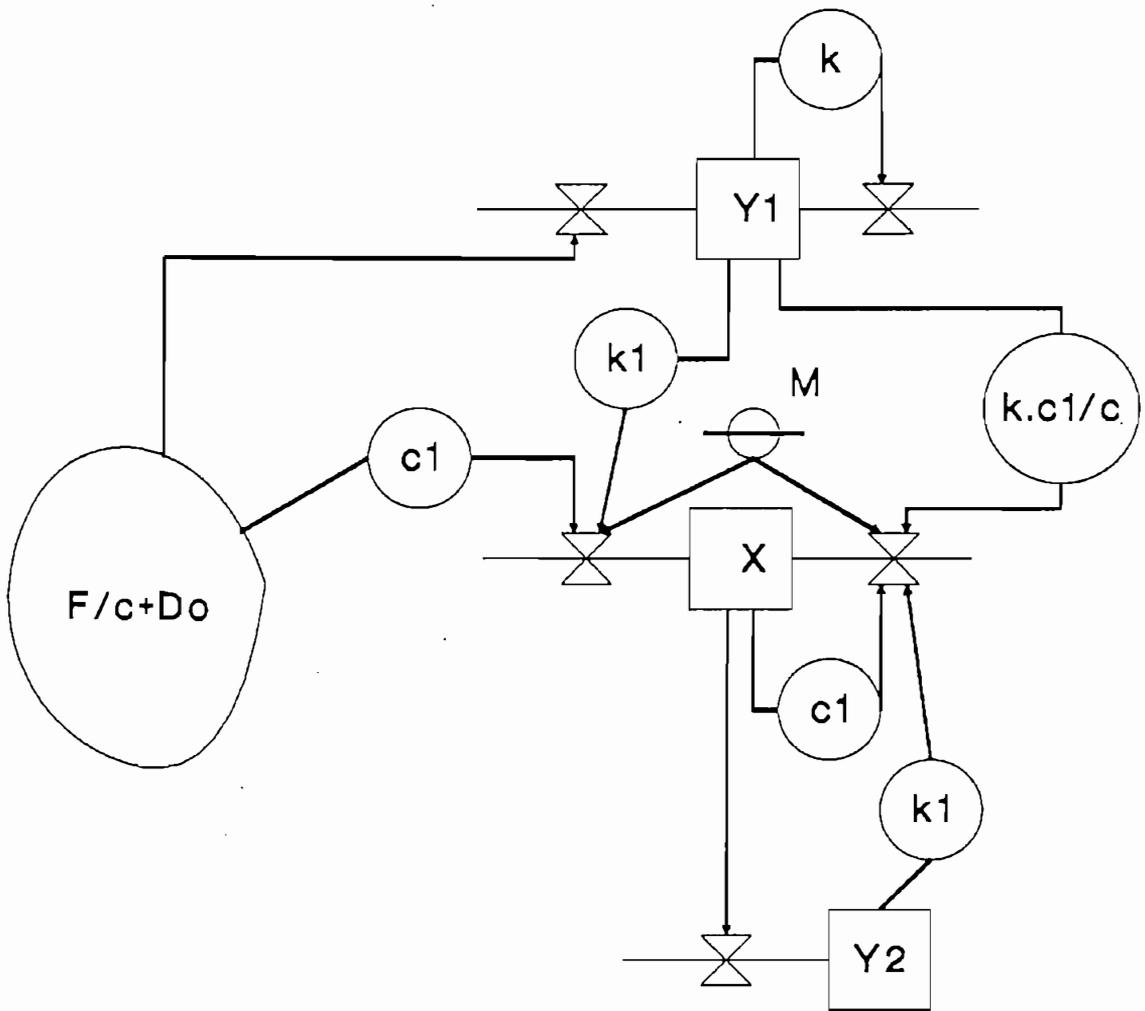


Figura 3.32 Diagramas de Forrester para el programa de golpe y vibración.

La estructura básica de los tres programas indica la figura 3.33.

Para entrar a la simulación del programa, existen dos caminos: usar el programa PROFESSIONAL DYNAMO por medio de PD.COM o usar solo el PROFESSIONAL DYNAMO SIMULATOR por medio del archivo SMLT.COM.

Siguiendo el primer camino, luego de una pantalla de presentación del paquete tenemos el siguiente menu:

#### Pantalla 1

```
Select command by arrows and Enter or by typing initial letter  
Commands:  Edit  Compile  Simulate  View  Document  Help  Quit
```

en la línea de comandos. Escogemos por medio de las teclas para movimiento del cursor (flechas) o apretando la tecla de la inicial el comando Simulate. A continuación, se presenta una pantalla que contienen los cuatros programas junto al siguiente menú en la línea de comandos:

#### Pantalla 2

[Modelos]

```
Select model to simulate:  arrows      Enter      (Esc to none)
```

Una vez escogido el modelo, en la línea de comandos tendremos el siguiente menú:

#### Pantalla 3

```
Simulating (modelo) : Changes Save Go Preserve Resume Help Esc Quit
```

con la opción Change, el programa nos presenta una pantalla indicandonos las variables del programa y los valores colocados en el programa original, ésta es similar a la pantalla 4.

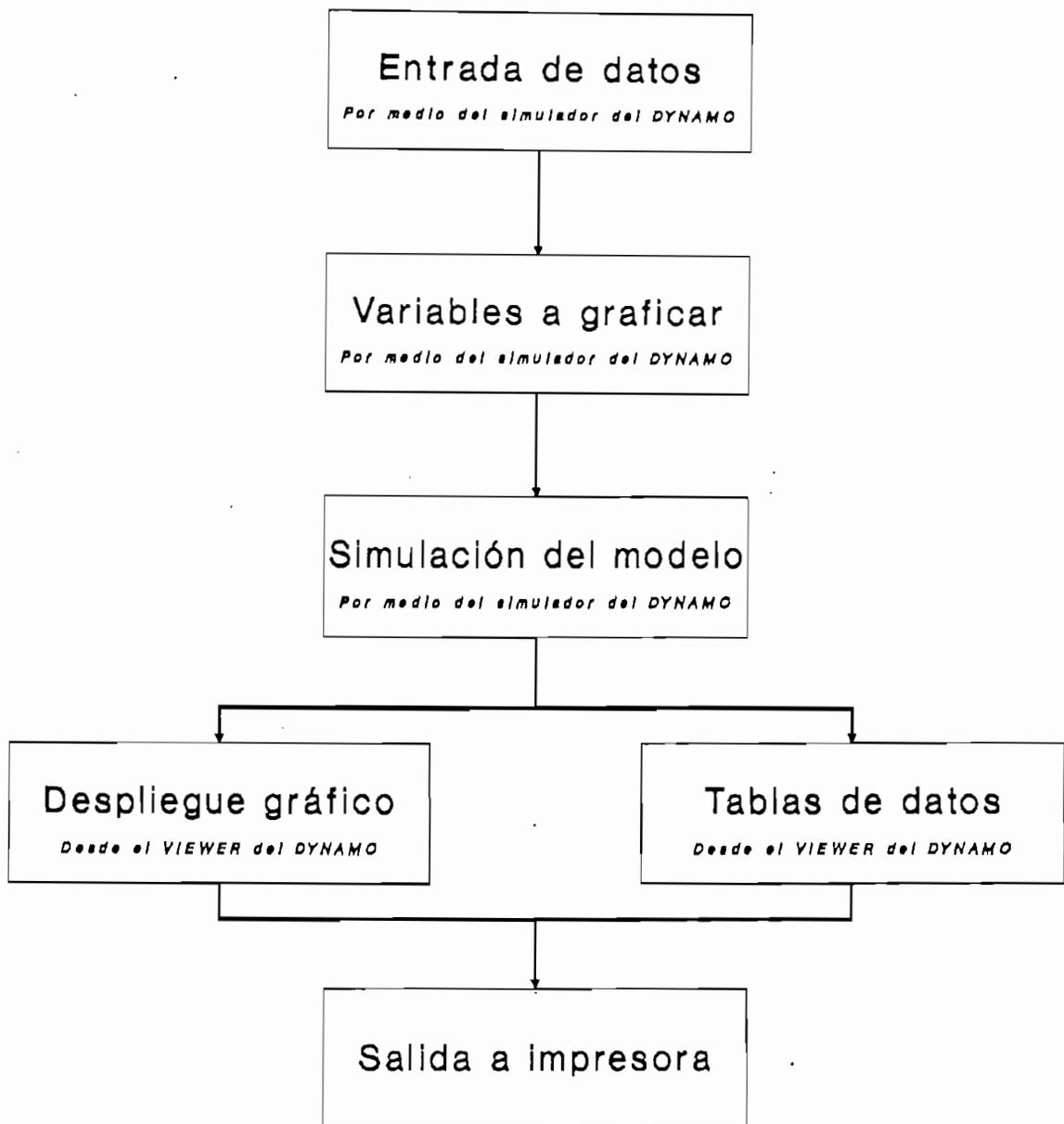


Figura 3.33 Estructura básica de los programas.

Para cambiar los parámetros del modelo solo es necesario colocarse sobre la variable a cambiar y luego ingresar desde el teclado el nuevo valor, similar para las especificaciones de arranque. Ingresando por la segunda vía, esto es arrancando desde el DOS con el formato C:\DYNAMO\SMLT [modelo].SMT, solo obtendremos las pantallas 3 y 4.

#### Pantalla 4

---

##### Parameters

---

Lista de parámetros del modelo

---

##### Run specifications

---

Especificaciones de arranque del modelo

Changes: Arrows Home End PgUp PgDn Values Enter for GTC Esc to cont

El segundo bloque de la figura 3.33 se presenta una vez ingresado los parámetros, escogiendo el comando Save en la pantalla 3, de la línea de menu tendremos entonces:

#### Pantalla 5

---

##### Rates and Auxiliares

---

Listado de variables de tasa y auxiliares

---

##### Levels

---

Listado de las variables de nivel usadas en el modelo

Saving: Arrows Home End PgUp PgDn Enter to (un)save Esc to cont

Con el mismo criterio usado para cambiar los valores de las variables, indicamos cuales de estas seran grabadas, presionando Esc, el programa entonces desplegará la siguiente indicación en la línea de comandos:

#### Pantalla 6

Type run name or type Enter for: [nombre del modelo]

Al presionar Enter el modelo comenzará a simularse mientras el simulador del DYNAMO nos da información del tiempo de simulación en la línea de comando, de la siguiente forma:

## Pantalla 7

Simulating [nombre del modelo]            Esc to abort            TIME =[tiempo]

Luego que el modelo se ha simulado, podemos mirar los resultados de la simulación en forma gráfica o tabular, para esto podemos usar dos opciones: si ingresamos por medio del PD.COM, podemos escoger en la pantalla 1 el comando View o desde el DOS ingresando C:\DYNAMO\VIEW [modelo].RSL.

Si se escogió la primera alternativa, posterior a la primera pantalla obtendremos un listado de los datos de los modelos que se pueden observar, y en la línea del menu tendremos:

Select run to view:            arrows    Enter    (Esc to continue)

Con las teclas de movimiento del cursor escogemos el modelo que deseamos observar, y presionamos Esc, entonces el computador nos indicará las diferentes alternativas para observar los datos desplegando en la línea de comandos el siguiente aviso:

Viewing [modelo] : Plot Select\_tabulate Tabulate\_all Old Help Esc Quit

Escogiendo el comando Plot, podremos observar una gráfica de los resultados, el computador nos indicará una lista de todas las variables grabadas, por medio de las teclas de movimiento del cursor escogeremos hasta siete de las variables, las que podran ser observadas en una sola escala o en diferente escala. Para observar en escala diferente señalaremos la variable y presionaremos Enter y para observar a la misma escala, señalaremos la variable y presionaremos [>] para la primera variable y Enter para las demás, las mismas que se graficarán a la misma escala. En la línea de comandos, el programa indicará:

Select vars to plot: Arrows Home End PgUp PgDn Enter Esc to continue

para datos en gráficos o

Select vars to tabulate: Arrows Home End PgUp PgDn Enter Esc to continue

para datos tabulares.

En el caso de optar por resultados gráficos, junto con los gráficos, la computadora nos indicará el siguiente menu:

View [Número de gráfico]: Next view\_No Print Esc Quit

por medio del cual se puede tener resultados impresos de la respuesta en el tiempo para una o todas las variables del modelo.

Si escogemos la opción de datos tabulados, luego de pedirnos el intervalo con que se quiere observar los datos, a través de la indicación siguiente:

Type print interval or type Enter for: [intervalo de datos]

en la línea de comandos, nos desplegará, junto con los datos de la variable escogida, el siguiente menu:

[Valores de las variables]

View [Número de despliege]: Arrows Home End <Ctl>+ <Ctl>- PgUp PgDn Next view\_no Print Esc Quit

En este caso tambien se puede obtener resultados impresos de los valores que toman las variables.

### 3.4.2 Estructura de los programas sobre descarga electrostática.

Estos programas son: A)PROG\_1 para el análisis quasi-estático y A)PROG\_2 para el análisis dinámico.

El diagrama de flujo para A)PROG\_1 lo podemos observar en la figura 3.34 y el listado en el apéndice A, numeral A1.

Los datos de entrada son:

VOLRAIR = Campo de ruptura del aire

Q1 = Cantidad de carga (en Coulombs) sobre el cuerpo cargado.

TABC11 = Datos de la curva, coeficientes de capacitancia del cuerpo cargado como función de la distancia al equipo.

TABC22 = Datos de la curva, coeficientes de capacitancia del equipo como función de la distancia al cuerpo cargado.

TABC12 = Datos de la curva, coeficientes de capacitancia cuerpo cargado - equipo en función de la distancia equipo - cuerpo cargado.

y las variables que se calculan son:

D = Distancia cuerpo cargado - equipo.

D1 = Variable auxiliar definida por [3.17]

V1 = Voltaje sobre el cuerpo cargado, definido por [3.15], antes de la descarga.

V2 = Voltaje sobre el equipo, definido por [3.16], antes de la descarga.

DIFV = Diferencia de voltaje equipo - cuerpo cargado, antes de la descarga.

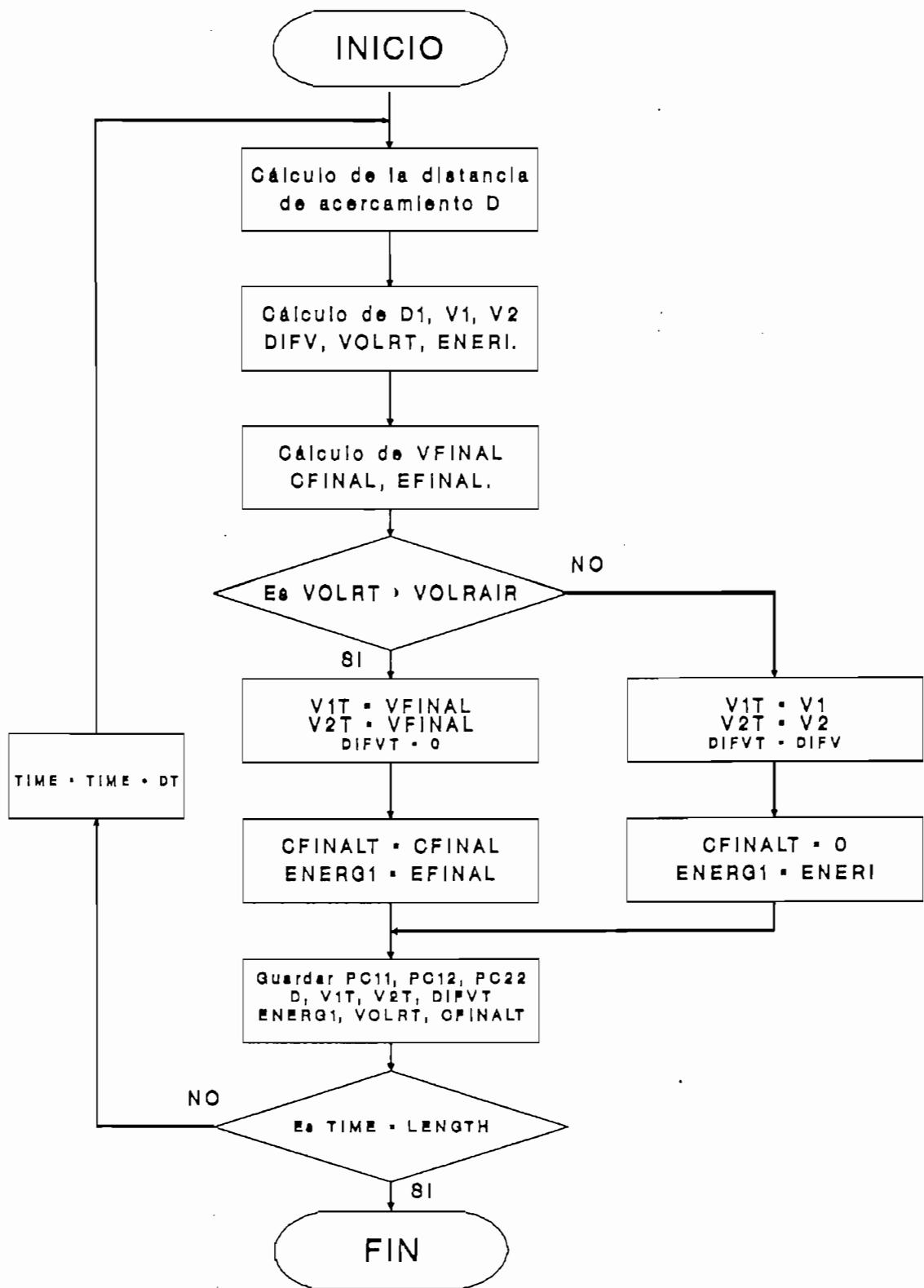


Figura 3.34 Diagrama de flujo para A)PROG\_1.

VOLR = Voltaje de ruptura para una separación  $D$ , antes de la descarga.

VOLRT = Campo de ruptura durante toda la simulación (en Volt/m).

ENERI = Energía antes de la descarga.

V1T = Voltaje sobre el cuerpo cargado, durante toda la simulación.

V2T = Voltaje sobre el equipo, durante toda la simulación.

CFINAL = Capacidad final.

CFINALT = Capacidad final durante toda la simulación.

VFINAL = Voltaje final sobre el cuerpo formado por el equipo y el cuerpo cargado.

VFINALT = Voltaje final, durante toda la simulación.

EFINAL = Energía final.

ENERG1 = Energía total, durante toda la simulación.

DIFVT = Diferencia de  $V2$  y  $V1$  durante toda la simulación.

para el caso 1, y

VPT = Voltaje sobre el cuerpo cargado, definido por [3.24], antes de la descarga.

Q2 = Carga inducida en el equipo, definida por [3.25], antes de la descarga.

ENERG = Energía del sistema antes de la descarga.

VRUP = Voltaje de ruptura, antes de la descarga

VRUPT = Voltaje de ruptura, durante toda la descarga.

ENERG2 = Energía total del sistema durante la simulación.

VOLT = Voltaje total del cuerpo cargado durante toda la simulación.

para el caso 2.

Toda la simulación se la realiza por medio de ecuaciones algebraicas, tablas de datos y ecuaciones de condiciones iniciales.

Las tablas para el cálculo de los coeficientes de capacidad son [40]:

A PC11.K=TABHL(TABC11,D.K,1,21,1)

T TABC11=160.9/151.0/145.3/141.2/138.1/135.5/133.3/131.4/129.8/128.3/126.9/  
125.7/124.6/123.5/122.6/121.7/120.8/120/119.3/118.5/117.9

A PC12.K=TABHL(TABC12,D.K,1,21,1)

T TABC12=-137.2/-127.3/-121.6/-117.5/-114.4/-111.8/-109.6/-107.7/-106/-104.5/  
-103.2/-102/-100.8/-99.8/-98.8/-97.9/-97.0/-96.2/-95.5/-94.8/-94.1

A PC22.K=TABHL(TABC22,D.K,1,21,1)

T TABC22=201.4/191.6/185.9/181.8/178.6/176.1/173.9/172/170.4/168.9/167.5/  
166.3/165.2/164.1/163.2/162.2/161.4/160.6/159.8/159.1/158.4

Para cada distancia entre el equipo y la persona existe un valor de PC11, PC22 y PC12 que representan las capacitancias propia de la persona, equipo y la capacitancia mutua, respectivamente. Los datos que se presentan con el

programa original se remplazarán con los datos que se obtienen del programa de cálculo de coeficientes, de acuerdo al equipo cuyo comportamiento se desee simular.

La capacitancia luego de la descarga se calcula por medio de la sentencia:

$$A \text{ CFINAL.K}=(\text{PC11.K}+\text{PC22.K}+2*\text{PC12.K}) *1\text{E}-9$$

La capacidad final durante toda la simulación se la calcula por medio de:

$$A \text{ CFINALT.K}=\text{FIFGE}(0,\text{CFINAL.K},\text{VOLRAIR},\text{VOLR.K})$$

Esta es igual a CFINAL después de la descarga y a 0 antes.

El programa asume que la persona cargada se acerca al equipo a velocidad constante, la distancia de ésta al equipo disminuye linealmente desde 10 cm. hasta 0 cm. en 5 seg., lo que se expresa mediante la sentencia:

$$A \text{ D.K}=10-2*\text{TIME.K}$$

$$A \text{ DIS.K}=\text{D.K}/100$$

Con el valor de las capacitancias calculamos los voltajes sobre el cuerpo y sobre el equipo, antes y después de la descarga:

$$A \text{ AUX.K}=-\text{PC12.K}$$

$$A \text{ D1.K}=(\text{PC11.K}-((\text{AUX.K}**2)/\text{PC22.K})) *1\text{E}-9$$

$$A \text{ V1.K}=\text{Q1}/\text{D1.K}$$

$$A \text{ V2.K}=-\text{V1.K}*\text{PC12.K}/\text{PC22.K}$$

$$A \text{ PUND.K}=\text{FIFGE}(0,1,\text{VOLRAIR},\text{VOLR.K})$$

$$A \text{ VFINAL.K}=\text{Q1}*\text{PUND.K}/\text{CFINAL.K}$$

En estas sentencias, AUX representa una variable

auxiliar mientras D1, V1 y V2 proceden de las ecuaciones [3.15] a [3.17]. PUND es una variable que hace cero el voltaje final, antes que se produzca la descarga.

El cálculo de estos voltajes nos permite conocer si el campo entre la persona y el equipo es lo suficientemente grande como para producirse la ruptura del aislante entre ellos (aire en la mayor parte de los casos). Esto se controla por las sentencias:

```
A DIFV.K=V1.K-V2.K
```

```
A DIFVT.K=FIFGE(DIFV.K,0,VOLRAIR,VOLR.K)
```

```
A VOLR.K=(DIFV.K/DIS.K)/100
```

```
A VOLRT.K=FIFGE(VOLR.K,0,VOLRAIR,VOLR.K)
```

Donde DIFV representa la diferencia de voltajes, VOLR voltaje de ruptura antes de la descarga, VOLRT voltaje de ruptura durante toda la simulación el cual es igual a VOLR antes de la descarga y a cero después, y DIFVT el comportamiento de la diferencia de voltaje durante toda la simulación, éste es igual a DIFV antes de la descarga y a 0 después.

Este campo de ruptura es comparado con el que puede soportar el aire, de acuerdo a esto el voltaje sobre el cuerpo será el voltaje final (VFINAL en el programa) o V1, mientras sobre el equipo tendremos V2 o VFINAL, como nos indican las sentencias:

```
A V1T.K=FIFGE(V1.K,VFINAL.K,VOLRAIR,VOLR.K)
```

```
A V2T.K=FIFGE(V2.K,VFINAL.K,VOLRAIR,VOLR.K)
```

Ademas de voltajes calculamos la energía antes y después de la descarga.

```
A ENERI.K=Q1*V1.K/2
```

```
A EFINAL.K=Q1*VFINAL.K/2
```

A ENERGI.K=FIFGE(ENERI.K,EFINAL.K,VOLRAIR,VOLR.K)

ENERGI representa la energía durante toda la simulación, esta es igual a ENERI antes de la descarga y a EFINAL después.

El diagrama de bloques, cuando el equipo tiene puesta a tierra es similar a aquel de la figura 3.34, la diferencia esta en las variables usadas, en este caso el voltaje sobre el equipo en todo momento es cero, el voltaje sobre la persona es VPT, ENERGI representa la energía antes de la descarga, VRUP la diferencia de voltaje sobre la distancia, mientras ENERGI2, VOLT y VRUPT representan la energía, el voltaje y el campo de ruptura, respectivamente, durante toda la simulación.

El diagrama de flujo para A)PROG\_2 observamos en la figura 3.35, y el programa en el punto A2 del apéndice A.

El sistema de ecuaciones diferenciales que se usan en este programa son de la [3.27] a la [3.33].

Los datos de entrada para este programa son:

C11 = Capacitancia propia del cuerpo cargado, el momento que se produce la descarga.

C22 = Capacitancia propia del equipo, el momento que se produce la descarga.

C12 = Capacitancia mutua cuerpo-equipo, el momento que se produce la descarga.

L1 = Inductancia asociada al cuerpo cargado.

R1 = Resistencia asociada al cuerpo cargado.

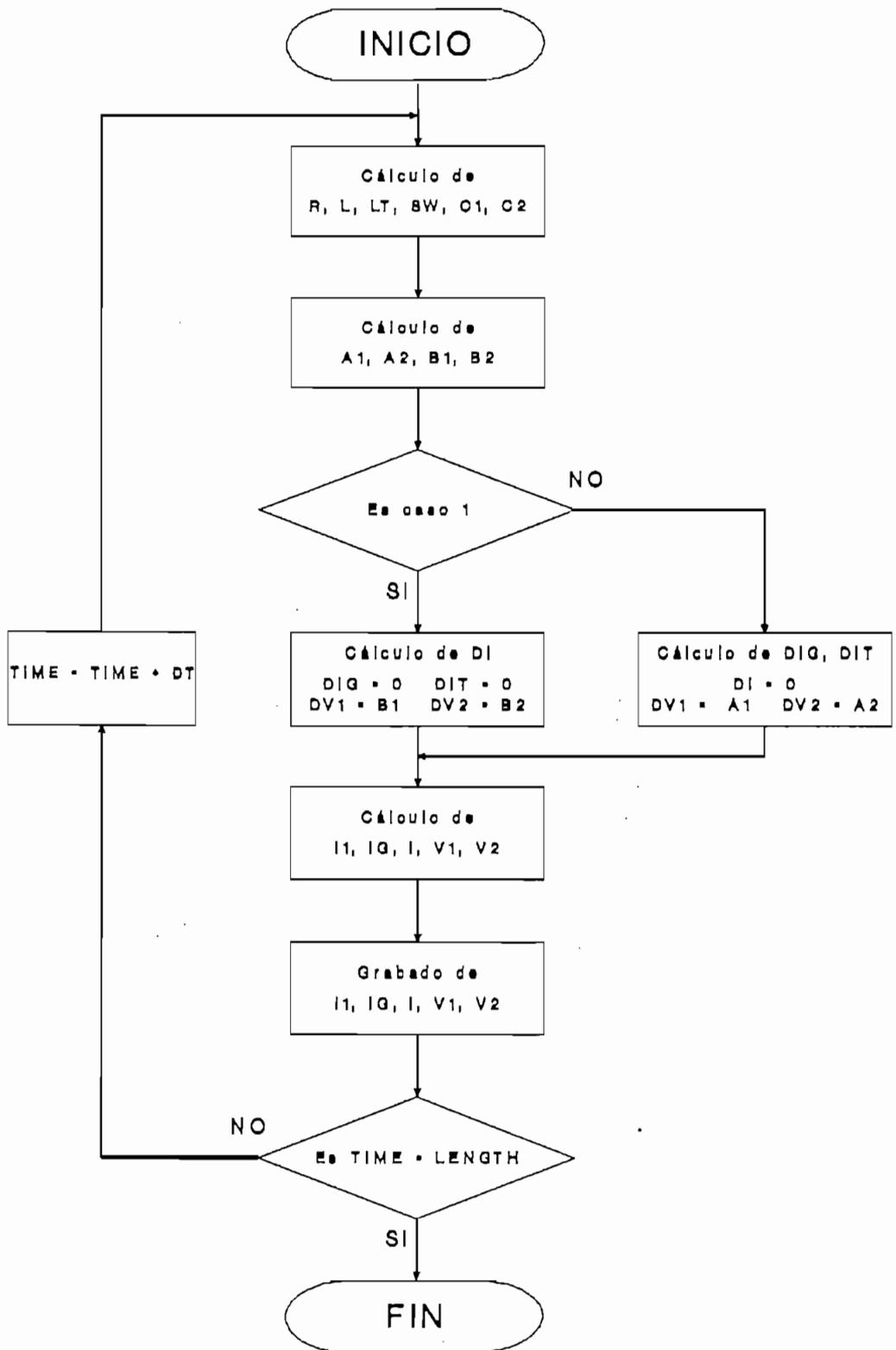


Figura 3.35 Diagrama de flujo de A)PROG\_2.

- L2 = Inductancia asociada al equipo.
- R2 = Resistencia asociada al equipo.
- Rg = Resistencia de la puesta a tierra (para el caso 2).
- Lg = Inductancia de la puesta a tierra (para el caso 2).
- V10 = Condición inicial del voltaje sobre el cuerpo cargado en el momento de la descarga.
- V20 = Condición inicial del voltaje sobre el equipo en el momento de la descarga.
- I10 = Condición inicial de corriente en el lazo cuerpo - equipo (para el caso 2).
- IG0 = Condición inicial de corriente en el lazo de puesta a tierra (para el caso 2).
- I0 = Condición inicial de corriente en el lazo cuerpo equipo (para el caso 1).
- CASO = Caso a simularse (1 o 2).

y los datos de salida son:

- V1 = Voltaje sobre el cuerpo cargado.
- V2 = Voltaje sobre el equipo.
- I1 = Corriente en el lazo cuerpo - equipo (caso 2).

- Ig = Corriente en el lazo a tierra (caso 1).
- I = Corriente en el lazo formado por el equipo y el cuerpo (para el caso 1).
- V = Voltaje que se disipa en la descarga (para el caso 1).

A cada una de las ecuaciones diferenciales, le corresponde una ecuación de nivel, una de tasa y una condición inicial, lo mismo que a las integrales. Estas ecuaciones son:

$$L \quad V11.K = V11.J + DT * DV11.JK$$

$$K \quad V11 = VIC$$

$$L \quad V21.K = V21.J + DT * DV21.JK$$

$$K \quad V21 = V2C$$

$$L \quad V.K = V.J + DT * DV.JK$$

$$K \quad V = V10 - V20$$

$$L \quad I11.K = I11.J + DT * DI11.JK$$

$$K \quad I11 = I10$$

$$L \quad IG1.K = IG1.J + DT * DIG1.JK$$

$$K \quad IG1 = IG0$$

$$L \quad IST.K = IST.J + DT * DIST.JK$$

$$K \quad IST = I0$$

Estas cinco ecuaciones resuelven numericamente las ecuaciones diferenciales y las integrales que caracterizan al modelo, las ecuaciones de tasa son:

$$R \quad A1.KL = I11.K / C1$$

$$R \quad A2.KL = (I11.K - IG1.K) / C2$$

R B1.KL=I.K/C1  
 R B2.KL=I.K/C2  
 R DI11.KL=(-V11.K-V21.K-I11.K\*R)/L)\*SW  
 R DIG1.KL=(V21.K-IG1.K\*RG)/LT)\*SW  
 R DIST.KL=(-(V.K+IST.K\*R)/L)\*(1-SW)  
 R DV.KL=(IST.K/CEQ)\*(1-SW)  
 R DV11.KL=FIFZE(B1.KL,A1.KL,SW)  
 R DV21.KL=FIFZE(B2.KL,A2.KL,SW)

El valor que se asigne a SW, como se indica en el diagrama de flujo de la figura 3.35, decidirá si los valores que se asignan a DV11 y DV21, son A1 y A2 o B1 y B2. Si se asignan A1 y A2, se modela el comportamiento dinámico de la descarga, con un equipo a tierra en caso contrario se supone que la tierra del equipo esta cortada o no la tiene. A su vez SW depende de CASO en la ecuación siguiente:

K SW=CASO-1  
 CASO 1 = PARA UN EQUIPO SIN PUESTA A TIERRA  
 CASO 2 = PARA UN EQUIPO CON PUESTA A TIERRA

Adicionalmente a estas ecuaciones fundamentales tenemos otras que sirven solo para acomodar parámetros, cambiar el sentido de circulación de la corriente, etc. Estas son:

A IG.K=-IG1.K  
 A V2.K=FIFZE(V2F.K,-V21.K,SW)  
 A V1.K=FIFZE(V1F.K,V11.K,SW)  
 A I1.K=-I11.K  
 A I.K=-IST.K  
 A V2F.K=V20+V21.K  
 A V1F.K=V10-V11.K  
 K C1=(C11+C12)\*1E-12  
 K C2=(C22+C12)\*1E-12  
 K CEQ=(C1\*C2)/(C1+C2)  
 K R=R1+R2  
 K L=(L1+L2)\*1E-9

K LT=FIFZE(1, LG, SW) \*1E-9

Finalmente para que el programa este completo es necesario ingresar las condiciones iniciales por medio de las ecuaciones C, usadas para dar valores a constantes:

C C11=0, C22=0, C12=0, L1=0, L2=0, R1=0, R2=0, RG=0, LG=0

C V10=0, V20=0, I10=0, IGO=0, IO=0, CASO=0

Con la idea de que el programa sea lo más general posible se asignan cero a todos los parámetros.

### 3.4.3 Estructura del programa sobre golpe y vibración.

El programa de golpe y vibración es B) PROG\_3.

El diagrama de flujo, correspondiente a este programa podemos observarlo en la figura 3.36, y el listado del programa en el apendice A, numeral A3.

Los datos de entrada son:

Para el acelerómetro piezoeléctrico:

A\_MASA = Masa del cristal.

A\_ESPES = Espesor del cristal.

A\_D33 = Propiedad elastoeléctrica del cristal.

A\_E33 = Propiedad elastoeléctrica del cristal.

A\_AREA = Area del cristal.

A\_N\_CRIS= Número de cristales.

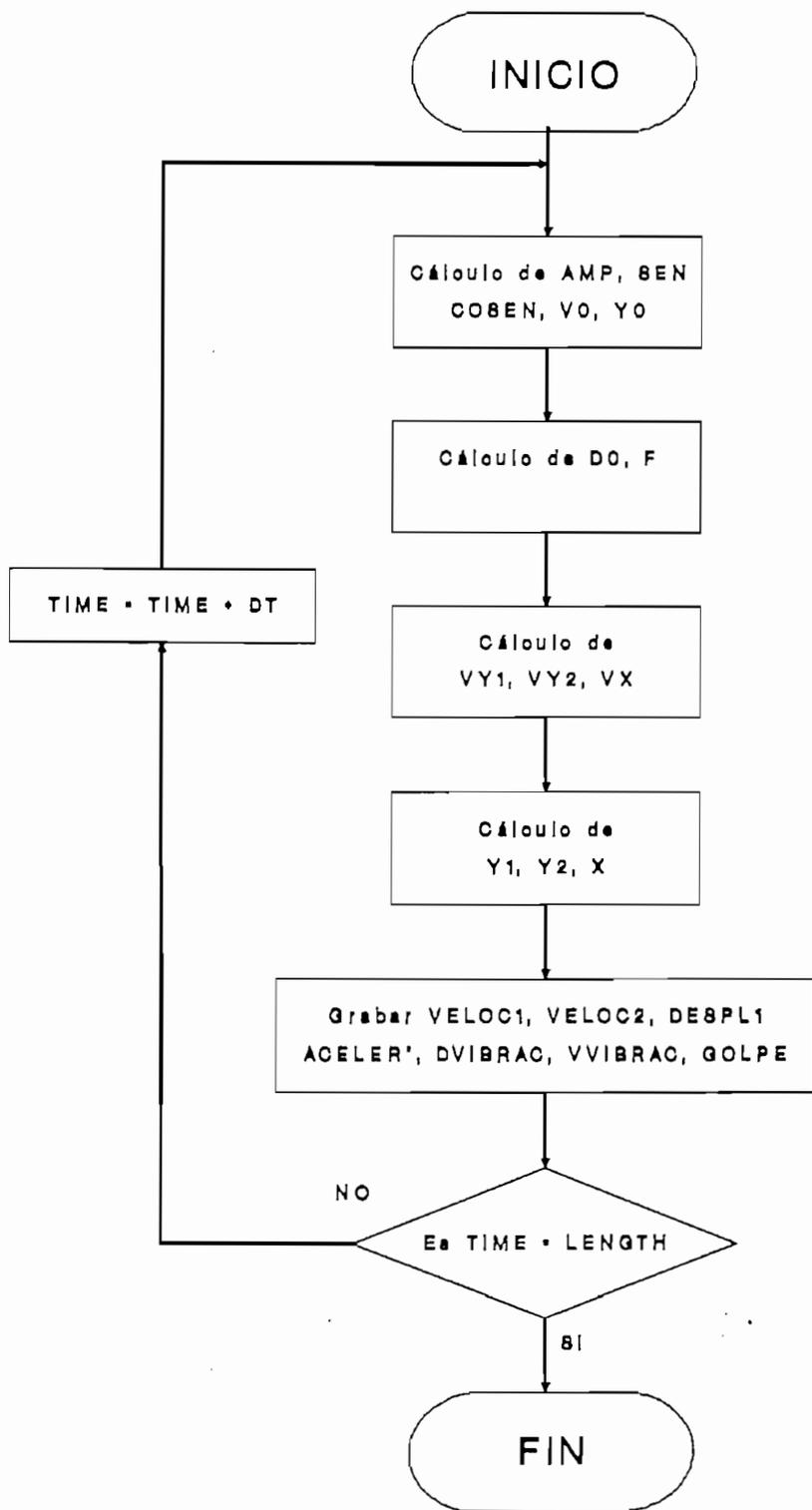


Figura 3.36 Diagrama de flujo para B)PROG\_3.

Para el equipo bajo prueba:

B\_MASA = Masa del equipo.

B\_C = Coeficiente de amortiguamiento interno.

B\_K = Coeficiente de elasticidad interna.

B\_K1 = Coeficiente de elasticidad externo.

B\_C1 = Coeficiente de viscosidad externo.

B\_D = Coeficiente de amortiguamiento de la onda vibratoria.

B\_PI = 3.14152.

Para las perturbaciones tenemos:

C\_VIB\_A = Amplitud inicial de la onda vibratoria.

C\_FRE\_V = Frecuencia de la onda vibratoria.

C\_DESFAS = Desfase de la onda vibratoria.

C\_INT\_V = Intervalo de duración de la onda vibratoria.

C\_INI\_V = Inicio de la onda de vibración.

D\_MAG\_G = Magnitud del golpe.

D\_INI\_G = Momento de inicio del golpe.

D\_INT\_G = Duración del golpe.

Y10 = Condición inicial para el desplazamiento de la cubierta.

- Y20 = Condición inicial para el desplazamiento del interior del equipo.
- Y0 = Condición inicial para la velocidad del interior del equipo.
- CASO1 = Activación o desactivación del golpe (activo con 1 y desactivo con 0).
- CASO2 = Activación o desactivación de la vibración (activa con 1 y desactiva con 0).

Los datos de salida son:

- VELOC1 = Velocida de la cubierta.
- VELOC2 = Velocida del interior del equipo.
- DESPL1 = Desplazamiento de la cubierta.
- DESPL2 = Desplazamiento del interior del equipo.
- ACELER2 = Aceleración del interior del equipo.
- DVIBRAC = Forma de onda de vibración.
- VVIBRAC = Forma de onda de la velocidad de la vibración.
- GOLPE = Forma de onda del golpe aplicado.
- ACELEROM= Forma de onda de la señal de voltaje del acelerómetro.

Las ecuaciones que caracterizan a este sistema son desde la [3.39] a la [3.48].

Las ecuaciones de nivel, encargadas de evaluarlas son:

L  $Y1.K=Y1.J+DT*VY1.JK$

K  $Y1=Y10$

L  $Y2.K=Y2.J+DT*VY2.JK$

K  $Y2=Y20$

L  $Y.K=Y.J+DT*VY.JK$

K  $Y=Y0$

y las ecuaciones de tasa son:

R  $VY1.KL=(F1.K-K1*Y1.K)/C1$

R  $VY2.KL=Y.K$

R  $VX.KL=-(K*Y2.K-K*Y1.K+C*Y.K-C*VY1.KL)/M$

El programa genera una señal pulso, que simula la aplicación de una fuerza puntual de magnitud FUERZ, duración INTER y generada a tiempo TINIC:

MACRO PULSO(FUERZ,TINIC,INTER)

NOTE GENERACION DE UN PULSO

NOTE FUERZ=AMPLITUD,TINIC=TO,INTER=DURACION

A PULSO.K=STEP(FUERZ,TINIC)-STEP(FUERZ,TINIC+INTER)

MEND

Para el sensor se crea también otro macro que contiene las ecuaciones que caracterizan a este. La entrada al macro SENSOR esta conformada por una señal de aceleración, y la salida corresponde a una señal de voltaje:

MACRO SENSOR(ACELER)

NOTE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE ACELERACION CON CRISTAL DE CUARZO

INTRN Q,N,MS,T,D33,E33,A

A Q.K=N\*D33\*MS\*ACELER.K

A SENSOR.K=Q.K\*T/(E33\*A)

K N=A\_N\_CRIS

K MS=A\_MASA

K T=A\_ESPES

K D33=A\_D33

K E33=A\_E33

K A=A\_AREA

C A\_MASA=0.01,A\_ESPES=0.001,A\_D33=2.31,A\_E33=4.68,A\_AREA=0.01

C A\_N\_CRIS=1

MEND

Adicionalmente podemos hallar en el programa inicial ecuaciones algebraicas auxiliares, encargadas de calcular variables auxiliares:

A AMP.K=AMPL\*EXP(-ATEN\*TIME.K)

A SEN.K=SIN(2\*PI\*FREC\*TIME.K-DESF)

A COSEN.K=COS(2\*PI\*FREC\*TIME.K-DESF)

A YO.K=AMP.K\*COSEN.K\*CASO2\*PULSO(1,TV,INV)

A VO.K=-AMP.K\*(2\*PI\*FREC\*SEN.K+ATEN\*COSEN.K)\*CASO2\*PULSO(1,TV,INV)

A F1.K=F.K+K1\*YO.K+C1\*VO.K

A F.K=PULSO(FM,TG,INTG)\*CASO1

A DVIBRAC.K=YO.K\*PULSO(1,TV,INV)

A VVIBRAC.K=VO.K\*PULSO(1,TV,INV)

A GOLPE.K=F.K

A ACELEROM.K=SENSOR(ACEL2R2.K)

Finalmente las ecuaciones que dan valor a las variables y condiciones iniciales, estas se generan por medio de sentencias C y K.

### 3.4.4 Estructura del programa sobre radiaciones.

El programa para la simulación de los efectos

radiactivos en un centro de cómputo es C)PROG\_4.

El diagrama de flujo de este programa lo podemos observar en la figura 3.37 y el listado del programa en el apéndice A, numeral A4.

El programa de simulación usa solo sentencias algebraicas, en razón que en el modelo no existen ecuaciones diferenciales.

Los datos de entrada son:

W = Ancho del canal del transistor.

L = Longitud del canal del transistor.

VSB = Voltaje fuente - sustrato.

VTO = Parámetro empírico de ajuste.

KS = Parámetro empírico de ajuste.

SIGMA = Parámetro empírico de ajuste.

FI = Parámetro empírico de ajuste.

LAMBDA1 = Parámetro empírico de ajuste.

LAMBDA2 = Parámetro empírico de ajuste.

TH1 = Parámetro empírico de ajuste.

TH2 = Parámetro empírico de ajuste.

DPARED = Densidad de la pared.

ANCHOP = Ancho de la pared.

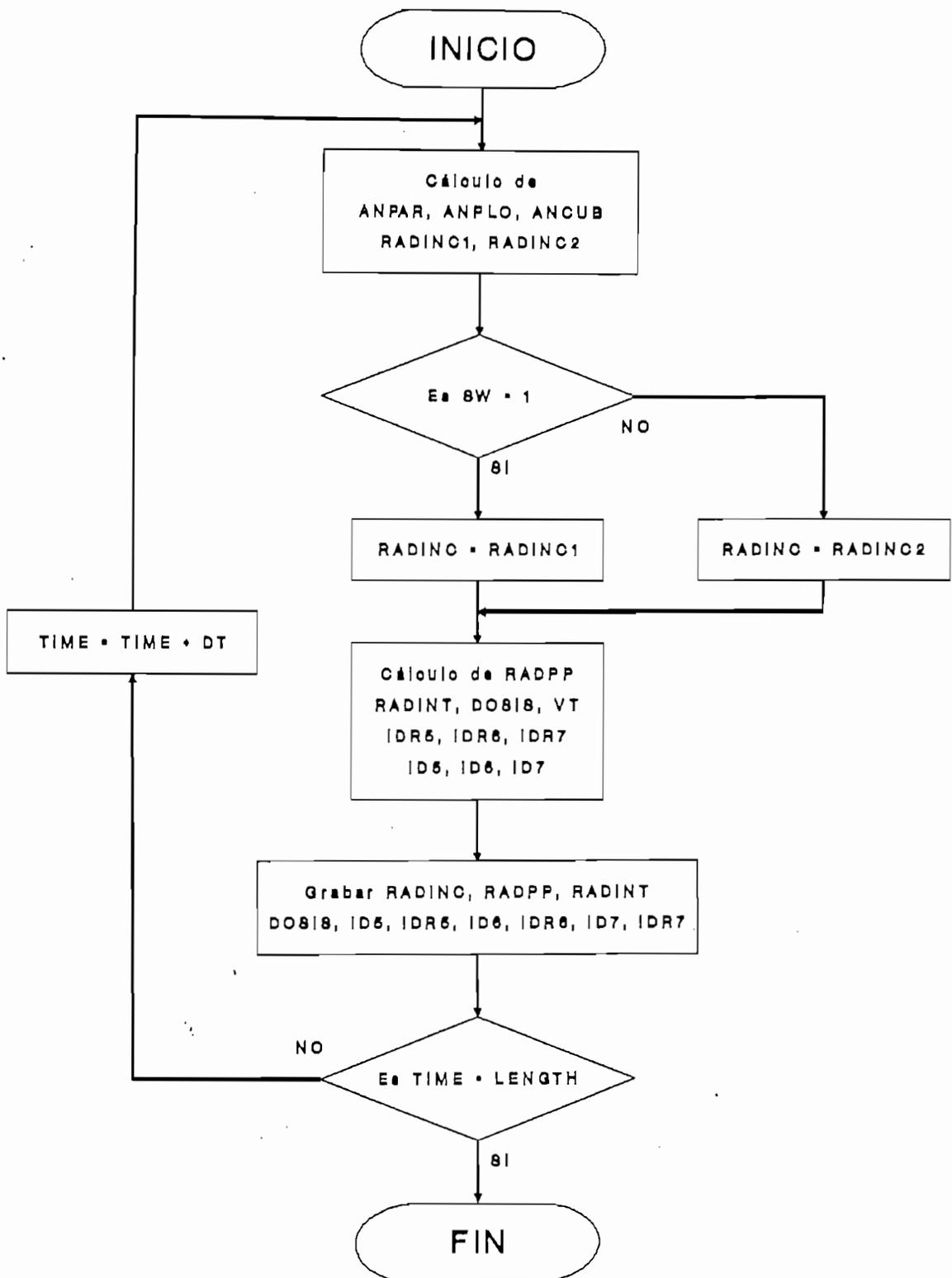


Figura 3.37 Diagrama de flujo para C)PROG\_4.

ANPLOI = Ancho del blindaje de plomo.

DCUB = Densidad del material de la cubierta.

ANCHO CB = Ancho de las paredes de la cubierta.

RAD = Altura del pulso de radiación.

TINC = Tiempo de incidencia del pulso de radiación.

SW = Variable para indicar incidencia de radiación pulso o rampa.

PEND = Pendiente de crecimiento de la radiación rampa.

TINIC = Tiempo de inicio de la incidencia de radiación rampa.

y los datos de salida son:

RADINC = Radiación incidente.

RADPP = Radiación que cruza la pared.

RADINT = Radiación en el recinto del centro de cómputo.

DOSIS = Dosis de radiación aplicada a los componentes del equipo.

ID5 = Curva característica normal a  $V_{GS} = 5$  V.

IDR5 = Curva característica bajo incidencia de radiación a  $V_{GS} = 5$  V.

ID6 = Curva característica normal a  $V_{GS} = 6$  V.

- IDR6 = Curva característica bajo incidencia de radiación a  $V_{GS}= 6$  V.
- ID7 = Curva característica normal a  $V_{GS}= 7$  V.
- IDR7 = Curva característica bajo incidencia de radiación a  $V_{GS}= 7$  V.

En base a las ecuaciones del transistor MOS ([3.65] a [3.71]), se genera un macro, este calcula las curvas del transistor en un ambiente sin radiación:

```
MACRO ID(VGS)
NOTE COMPORTAMIENTO NORMAL DE ID
INTRN VDS,VGT,VTS,LAMBDA,DENBETA,BETA,D1,VDSAT,IDA,IDB

A VDS.K=RAMP(1,TO)
N VGT=VGS-VTS
N VTS=VTO+SIGMA*(SQRT(VSB+FI)-SQRT(FI))
N LAMBDA=LAMBDA2/(L*(1+LAMBDA1*VGT))
N DENBETA=1+(TH1+TH2/L)*VGT
N BETA=2*KS*W/(DENBETA*L)
N D1=1-SQRT(1+(LAMBDA**2*VGT*VGT))
N VDSAT=VGT+D1/LAMBDA
A IDA.K=BETA*VDS.K*(VGT-VDS.K/2)
A IDB.K=BETA*(1+LAMBDA*(VDS.K-VDSAT))*(VDSAT*(VGT-VDSAT/2))
A ID.K=FIFGE(IDA.K,IDB.K,VDSAT,VDS.K)

C W=10,L=70,VS=5,VTO=0.47,KS=15.40,SIGMA=0.68,FI=0.59
C LAMBDA1=0.08,LAMBDA2=0.17,TH1=2.85E-2,TH2=0,TO=0
MEND
```

El segundo macro usado genera las curvas del transistor en caso que haya incidencia de radiación en el medio:

```
MACRO IDR(RVGS,VTS)
NOTE COMPORTAMIENTO DE ID EN MEDIO RADIATIVO
```

INTRN VDS,VGT,LAMBDA,DENBETA,BETA,DI,VDSAT,IDA,IDB

A VDS.K=RAMP(1,TO)  
A VGT.K=RVGS-VTS.K  
A LAMBDA.K=LAMBDA2/(L\*(1+LAMBDA1\*VGT.K))  
A DENBETA.K=1+(TH1+TH2/L)\*VGT.K  
A BETA.K=2\*KS\*W/(DENBETA.K\*L)  
A DI.K=1-SQRT(1+(LAMBDA.K\*\*2\*VGT.K\*VGT.K))  
A VDSAT.K=VGT.K+DI.K/LAMBDA.K  
A IDA.K=BETA.K\*VDS.K\*(VGT.K-VDS.K/2)  
A IDB.K=BETA.K\*(1+LAMBDA.K\*(VDS.K-VDSAT.K))\*VDSAT.K\*(VGT.K-VDSAT.K/2)  
A IDR.K=FIFGE(IDA.K,IDB.K,VDSAT.K,VDS.K)

MEND

El programa principal, por medio de las tablas que relacionan la radiación y la transmisibilidad en %, que son:

TABLAS DE TRANSMISIBILIDAD DE RADAICION EN %  
PARA INCIDENCIA PERPENDICULAR A LA PARED

A PAREDO.K=TABXT(TABPO,ANPAR.K,0,20,2.5) EN PULGADAS

T TABPO=100/69/40/22/11/5.9/2.9/1.5/0.7

A PLOMOO.K=TABXT(TABPLO,ANPLO.K,0,8,1) EN PULGADAS

T TABPLO=100/68/40/23/13/7/3.8/2/1.2

A CUBO.K=TABXT(TABCUB,ANCUB.K,0,20,2.5) EN PULGADAS

T TABCUB=100/95/62/46/31/21/16/9.8/6.9

calcula la dosis aplicada al semiconductor:

PROGRAMA PRINCIPAL

A ANPAR.K=ANCHOP\*DPARED/5.969

A ANPLO.K=ANPLOI/2.54

A ANCUB.K=ANCHOCB\*DCUB/2.3368

```

A RADINC1.K=STEP (RAD, TINC)
A RADINC2.K=RAD+RAMP (PEND, TINIC)
A RADINC.K=FIFZE (RADINC1.K, RADINC2.K, SW)

```

```

A RADPP.K=RADINC.K*PAREDO.K/100
A RADINT.K=RADPP.K*PLOMOO.K/100
A DOSIS.K=RADINT.K*CUBO.K/100

```

```

C DPARED=2.39, ANCHOP=25, ANPLOI=0, DCUB=1.02, ANCHOCB=2
C RAD=100, TINC=0, SW=1
C PEND=19.975, TINIC=0, VTO=1.65

```

y en base a esta, junto con la curva dada por la siguiente sentencia T calcula el valor de la variación de VT (voltaje umbral) :

#### TABLA DE VARIACION DE VT

```

A NMOS.K=TABXT (TABNMOS, DOSIS.K, 100, 1000, 100)
T TABNMOS=0.5/0.83/1/1.17/1.26/1.38/1.43/1.5/1.67/1.8

```

El valor de VT, que se usa en el segundo macro se calcula en el programa principal por medio de la sentencia:

```

A VT.K=VTO-NMOS.K

```

Finalmente el programa principal calcula las curvas características de los transistores para varios valores del voltaje  $V_{GT}$  (definido por la ecuación algebraica [3.77]) con y sin incidencia de radiación:

```

A ID5.K=ID(5)
A IDR5.K=IDR(5, VT.K)

A ID6.K=ID(6)
A IDR6.K=IDR(6, VT.K)

```

A ID7.K=ID(7)

A IDR7.K=IDR(7,VT.K)

En este programa se requiere de un grupo de sentencias C para dar los valores a las constantes.

## CAPITULO 4 : APLICACIONES Y CONCLUSIONES

- 4.1 Resultados de la simulación
- 4.2 Simulación para un sistema real
- 4.3 Conclusiones

Para probar la validez y eficiencia de los programas realizados se han corrido estos para dos escenarios reales: el centro de cómputo de PETROECUADOR y de la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL.

Para el caso de PETROECUADOR, se han realizado pruebas con datos de los equipo 4381 y 3430, usandose los programas de descarga electrostática y para la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL, con datos del procesador, usando el programa de golpe y vibración. Las especificaciones completas de estos equipos se encuentran en el apéndice D.

De los programas realizados se han sacados muchos resultados, pero no todos se incluyen en la presente tesis. Los programas permiten variar todos sus parámetros, sin embargo para las simulaciones se han variado los de mayor interés.

#### 4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACION.

Los resultados que se obtienen para cada uno de los programas desarrollados son los siguientes:

Ejemplo 1.- Con A)PROG\_1.

Los datos que se usaron de entrada se indican en la tabla 4.1 y los resultados gráficos en las figuras 4.1 y 4.2. La definición de los datos se explican en el punto 3.4 de la presente tesis.

La figura 4.1 presenta los resultados para un equipo con puesta a tierra y la figura 4.2 para uno sin puesta a tierra. En ambas figuras se presentan curvas de voltajes, energias y campos. El eje horizontal, representa al tiempo y el vertical es función de la variable que se analice. El significado de las variables y las unidades en las que se grafican son:

		Parameters					
	Q1	VOLRAIR					
Present	1.e-6	30.					
		Tables					
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC11	171.33	160.	154.4	149.9	146.5	143.7
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC11	141.3	139.3	137.5	135.8	134.4	133.
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC11	131.8	130.7	129.6	128.6	127.7	126.8
		19	20	21			
Present	TABC11	126.	125.2	124.4			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC12	-151.	-140.3	-134.	-129.6	-126.1	-123.3
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC12	-121.	-119.	-117.	-115.5	-114.	-112.7
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC12	-111.4	-110.3	-109.2	-108.2	-107.3	-106.4
		19	20	21			
Present	TABC12	-105.6	-104.8	-104.			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC22	239.2	228.5	222.2	217.8	214.3	211.5
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC22	209.2	207.1	205.3	203.7	202.2	200.9
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC22	199.6	198.5	197.4	196.4	195.5	194.6
		19	20	21			
Present	TABC22	193.8	193.	192.3			
		Run specifications					
	DT	LENGTH	SAVPER				
Present	1.e-3	1.	5.e-3				

Tablas 4.1 Datos para la ejecución del programa de descarga electrostática, estado quasi - estático, para el ejemplo 1.

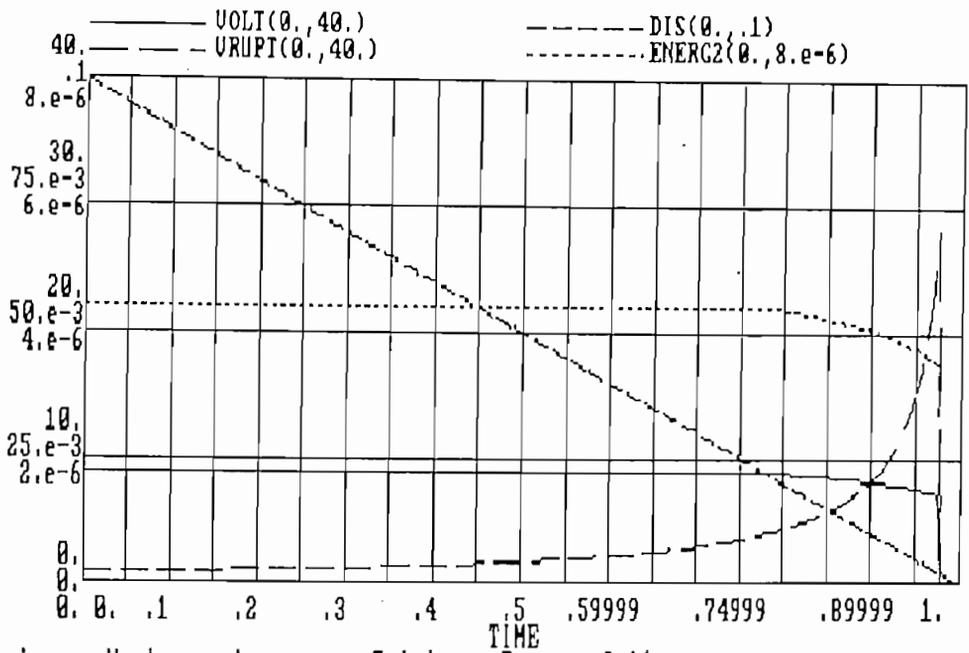


Figura 4.1 Resultados de A)PROG\_1 con los datos de la tabla 4.1, para un equipo con puesta a tierra.

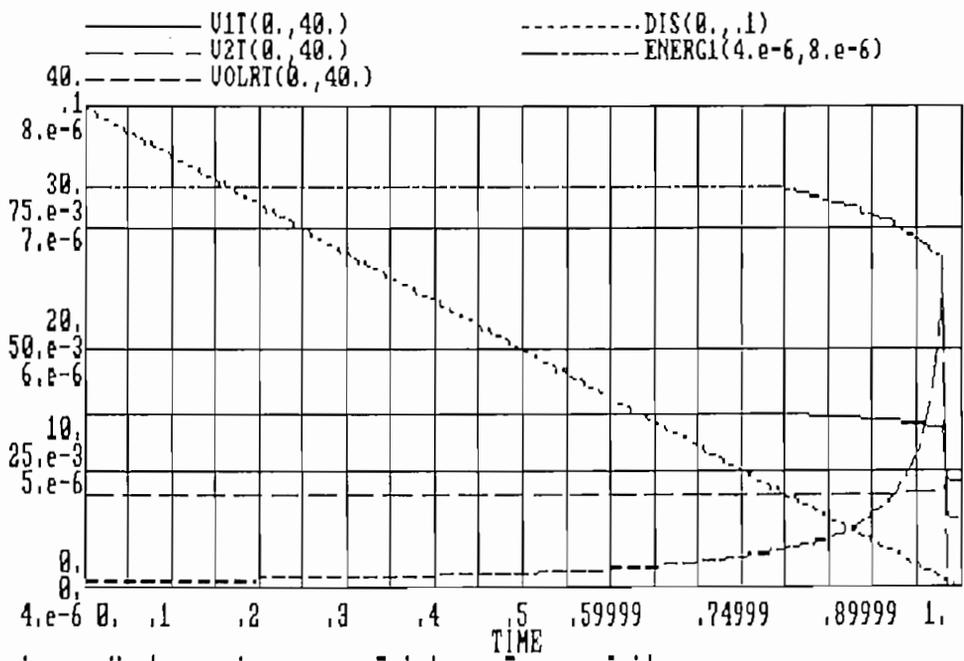


Figura 4.2 Resultados de A)PROG\_1 para los datos de la tabla 4.1, considerando que el equipo no tiene puesta a tierra.

DIS = distancia cuerpo cargado - equipo, en m.

Para el caso del equipo a tierra:

ENERG2 = Energía del sistema, en Joules.

VOLT = Voltaje sobre el cuerpo cargado, en Voltios.

VRUPT = Voltaje sobre distancia cuerpo cargado - equipo, en Voltios sobre cm.

Para el caso del equipo sin puesta a tierra:

V1T = Voltaje sobre el cuerpo cargado, en Voltios.

V2T = Voltaje sobre el equipo, en Voltios.

VOLRT = Voltaje sobre la distancia cuerpo cargado - equipo, en Voltios sobre cm.

ENERG2 = Curva de energía del sistema, en Joules.

Ejemplo 2.- Con A)PROG\_2.

Los datos de entrada al programa, para el equipo con y sin puesta a tierra, se indican en las tablas 4.2 y 4.3, respectivamente, mientras que, los resultados se dan en las figuras 4.3 y 4.4. Estas figuras muestran el comportamiento transitorio de corrientes y voltajes, el momento que se produce la descarga electrostática.

El eje horizontal en los gráficos representa el tiempo en segundos y el eje vertical, según la variable que se tome representa:

I = Corriente sobre el lazo cuerpo cargado - equipo, sin puesta a tierra y medido en amperios.

I1 = Corriente sobre el lazo cuerpo cargado - equipo, con puesta a tierra y medido en amperios.

IG = Corriente en el lazo equipo-tierra, para un equipo con puesta de tierra y medido en amperios.

V1 = Voltaje sobre el cuerpo cargado, en voltios.

		Parameters						
		C11	C12	C22	CASO	L1	L2	LG
Present		157.19	-137.14	225.34	2.	50.	50.	1.
		R1	R2	RG	V10	V20		
Present		1500.	500.	25.e-3	6361.5	0		
		Run specifications						
		ABS_ERR	DT	LENGTH	NS_SEED	SAVPER		
Present		0.	50.e-12	.5e-6	0.	2.e-9		

Tabla 4.2 Datos para la ejecución del programa de análisis dinámico de la descarga electrostática, considerando el equipo con puesta de tierra.

		Parameters						
		C11	C12	C22	CASO	L1	L2	LG
Present		159.99	-140.29	228.49	1.	50.	50.	0.
		R1	R2	RG	V10	V20		
Present		1500.	500.	0.	13.54e3	8313.5		
		Run specifications						
		ABS_ERR	DT	LENGTH	NS_SEED	SAVPER		
Present		0.	50.e-12	.5e-6	0.	2.e-9		

Tabla 4.3 Datos para la ejecución del programa de análisis dinámico de la descarga electrostática, considerando el equipo sin puesta de tierra.

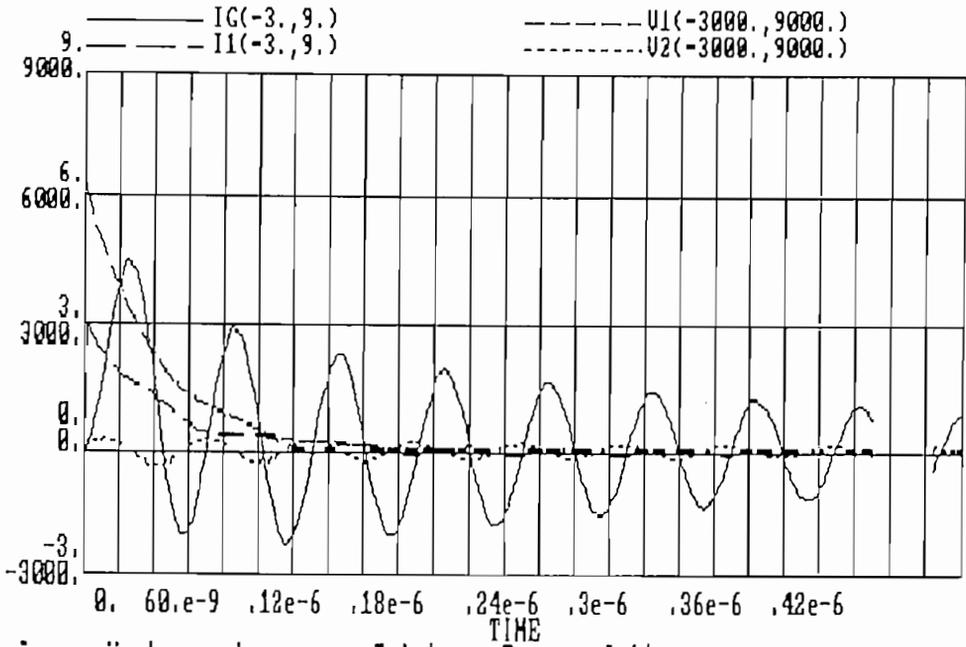


Figura 4.3 Curvas resultantes para los datos de la tabla 4.2. Las curvas representan voltajes y corriente el momento que se produce el ESD, con el equipo a tierra.

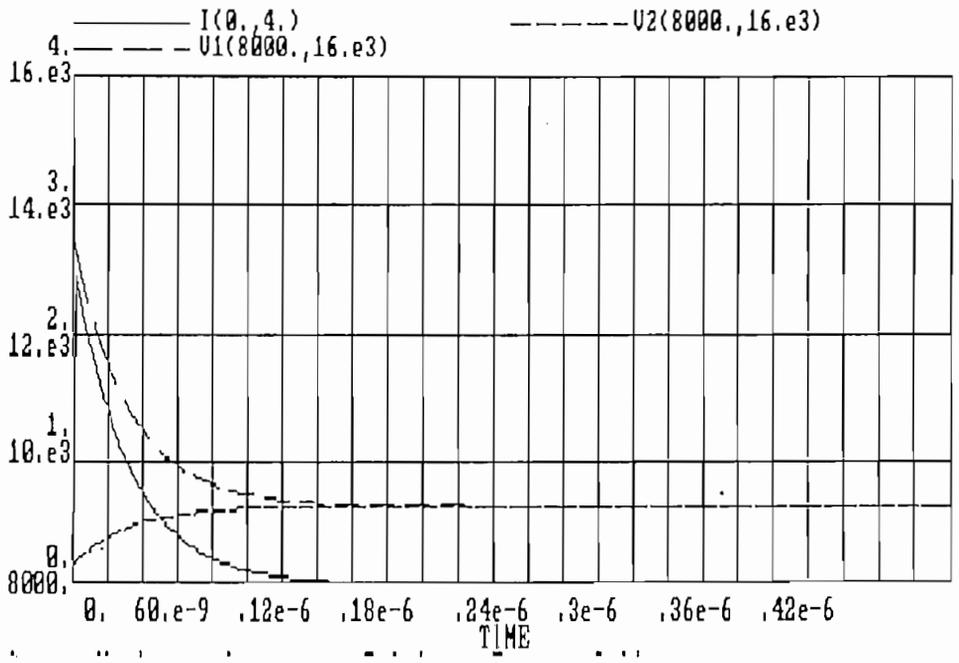


Figura 4.4 Curvas resultantes para los datos de la tabla 4.3. Las curvas representan voltajes y corriente el momento que se produce el ESD, con el equipo sin tierra.

V2 = Voltaje sobre el equipo, en voltios.

### Ejemplo 3.- Con B)PROG\_3.

En este ejemplo, usando las tablas de datos, 4.4, 4.5 y 4.6, se obtuvieron las respuestas gráficas indicadas en las figuras, desde la 4.5 a la 4.9. El significado de los datos de entrada se indican en el punto 3.4, y los resultados obtenidos en esta figura son:

- GOLPE = Señal de excitación golpe, en Newtons.
- DVIBRAC = Señal de excitación vibratoria, en metros.
- VVIBRAC = Señal de velocidad de la onda vibratoria, en metros por segundo.
- DESPL1 = Desplazamiento de la carcaza del equipo, en metros.
- DESPL2 = Desplazamiento del interior del equipo, en metros.
- VELOC1 = Velocidad de la carcaza del equipo, en metros por segundo.
- VELOC2 = Velocidad del interior del equipo, en metros por segundo.

En la figura 4.5 podemos observar, la forma de onda del golpe aplicado a la cubierta del equipo y la respuesta de la misma en desplazamiento y velocidad, la figura 4.6 indica la forma de onda del golpe aplicado, junto a la respuesta de velocidad y desplazamiento del interior del equipo, la figura 4.7 muestra una visión ampliada de la onda vibratoria en desplazamiento y velocidad, la figura 4.8 nos muestra la forma de onda de velocidad y desplazamiento de la vibración, junto a las respuesta de desplazamiento en el interior y velocidad en la cubierta, finalmente la figura 4.9 nos indica la respuesta de desplazamiento del equipo ante la incidencia conjunta de golpe y vibración, las cuales también se muestran en la figura.

Parameters							
	B_C	B_C1	B_K	B_K1	B_MASA	CAS01	D_INI_G
Present	10.e3	8000.	50.e3	5000.	56.e3	1.	30.
	D_INT_G	D_MAG_G					
Present	1.	1.					
Run specifications							
	DT	LENGTH	SAVPER				
Present	50.e-3	120.	.4				

Tabla 4.4 Datos para el programa sobre golpe y vibración, cuando sobre el equipo se aplica un golpe.

Parameters							
	B_C	B_C1	B_K	B_K1	B_MASA	CAS01	CAS02
Present	10.e3	8000.	50.e3	5000.	56.e3	0.	1.
	C_FRE_V	C_INI_V	C_INT_V	C_VIB_A	D_INI_G	D_INT_G	D_MAG_G
Present	60.	30.	30.	.1e-3	0.	0.	0.
Run specifications							
	DT	LENGTH	SAVPER				
Present	50.e-3	120.	.4				

Tabla 4.5 Datos para el programa sobre golpe y vibración, cuando sobre el equipo incide una onda vibratoria.

Parameters							
	B_C	B_C1	B_K	B_K1	B_MASA	CAS01	CAS02
Present	10.e3	8000.	50.e3	5000.	56.e3	1.	1.
	C_FRE_V	C_INI_V	C_INT_V	C_VIB_A	D_INI_G	D_INT_G	D_MAG_G
Present	60.	30.	30.	.1e-3	25.	1.	5.
Run specifications							
	DT	LENGTH	SAVPER				
Present	50.e-3	120.	.4				

Tabla 4.6 Datos para el programa sobre golpe y vibración, en caso que se aplica al equipo un golpe y una onda vibratoria conjuntamente.

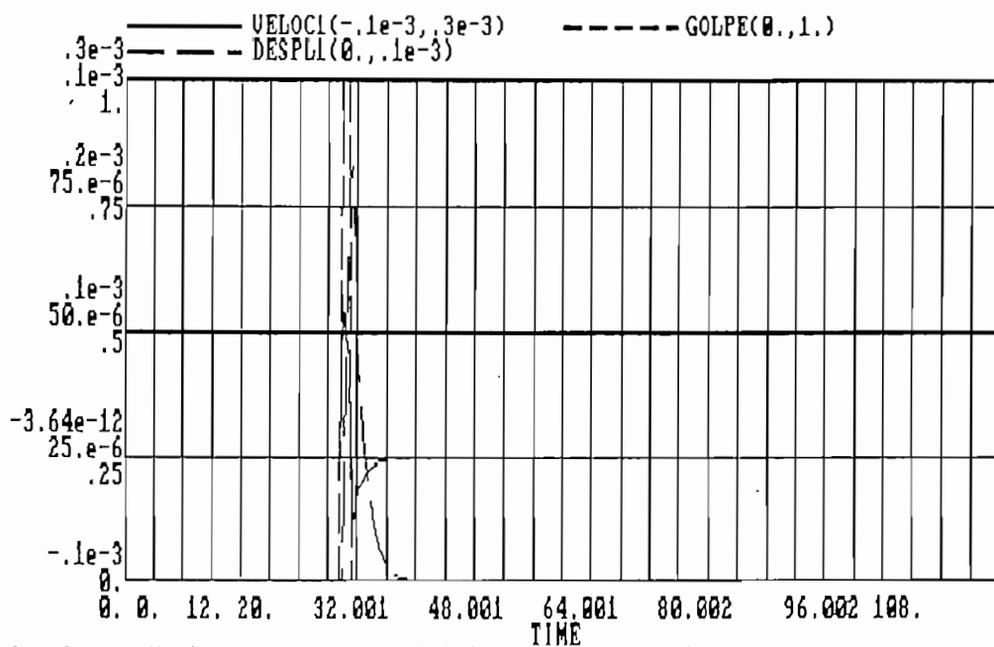


Figura 4.5 Formas de onda en la cubierta y golpe de entrada para la tabla de datos 4.4.

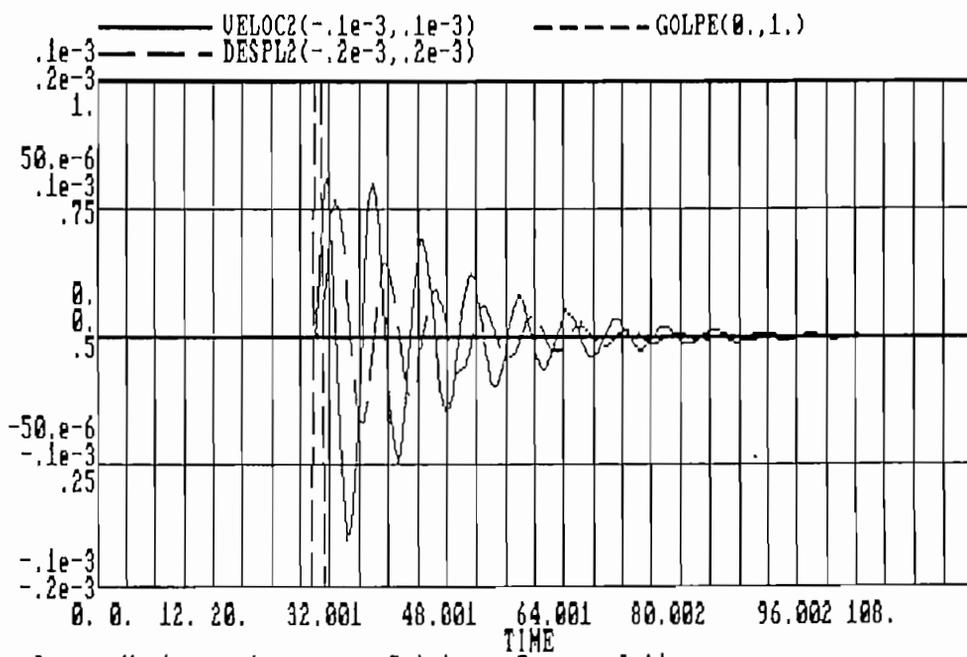


Figura 4.6 Formas de onda en el interior del equipo y golpe aplicado para los datos de la tabla 4.4.

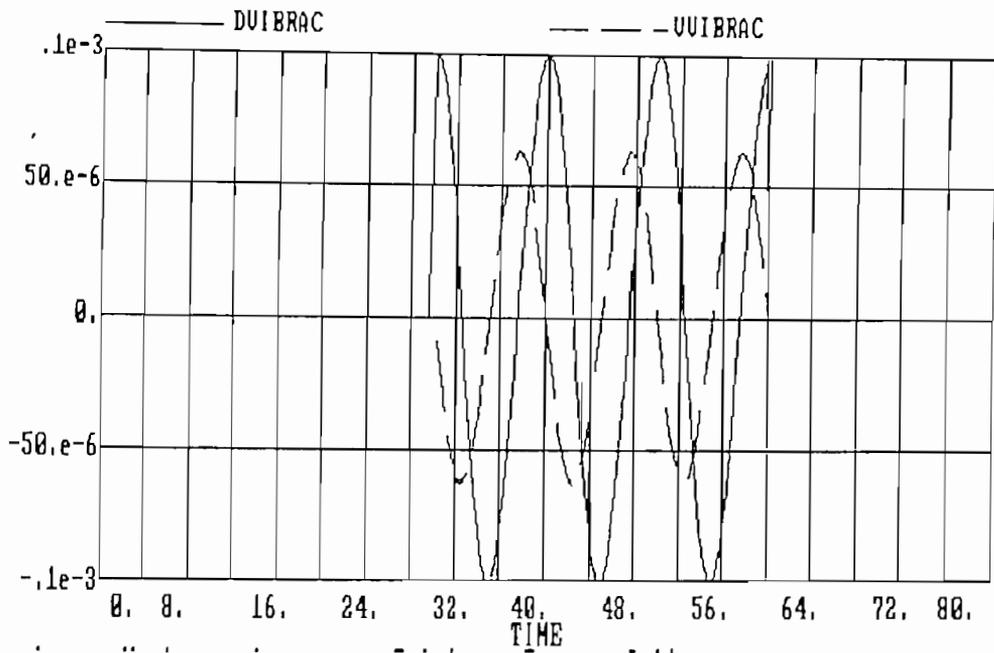


Figura 4.7 Formas de onda de vibración, en escala ampliada.

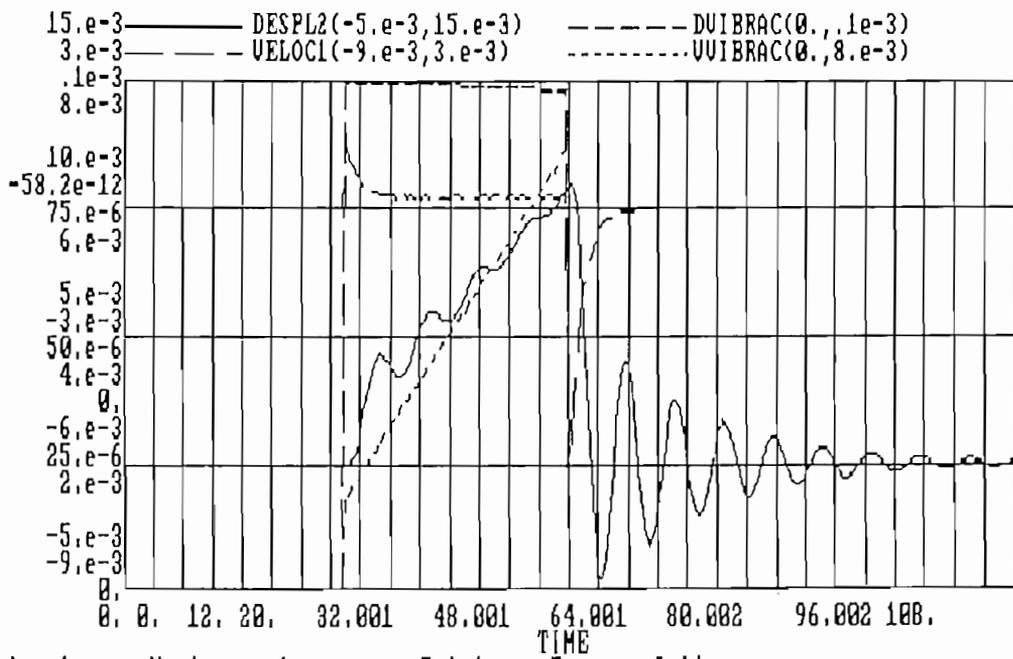


Figura 4.8 Gráficos de la respuesta de velocidad en la cubierta y desplazamiento en el interior de un equipo junto con las ondas vibratorias de excitación para los datos de la tabla 4.5.

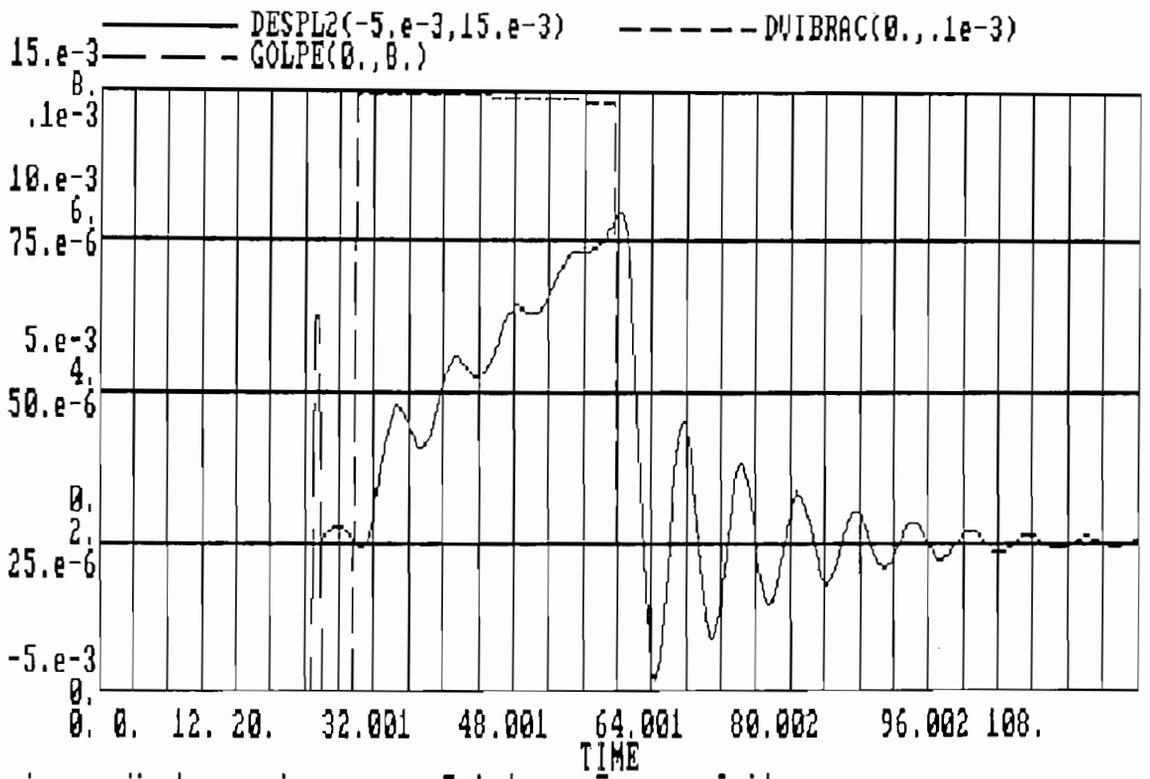


Figura 4.9 Onda de desplazamiento en el interior del equipo, junto a la onda de vibración y golpe aplicados, para los datos de la tabla 4.6.

#### Ejemplo 4.- Con C)PROG\_4.

Los datos para la ejecución de este programa se indican en la tabla 4.7 y los resultados para la misma se visualizan en las figuras 4.10 y 4.11. El eje horizontal en la figura 4.10 esta en segundos y en la figura 4.11, se mide en voltios y el eje vertical, según la curva, representa:

DOSIS = Dosis de radiación aplicada al integrado, en  
KRad(Si).

RADINC = Dosis de radiación incidente del exterior, en  
KRad(Si).

RADINT = Dosis de radiación en el interior del centro de  
cómputo, en KRad(Si).

RADPP = Radiación en el interfase pared - blindaje, en  
KRad(Si).

IDn = Con n de 5 a 7, corriente de drenaje de un  
transistor MOS de un integrado, sin incidencia de  
radiación, medida en miliamperios.

IDRn = Con n de 5 a 7, corriente de drenaje de un  
transistor MOS de un integrado, con incidencia de  
radiación, medida en miliamperios.

En la curva 4.10 podemos observar los niveles de radiación en diferentes lugares, dentro del centro de cómputo, mientras que la figura 4.11 representa las curvas características de un transistor MOS, con y sin incidencia de radiación.

Parameters							
	ANCHOCB	ANCHOP	ANPLOI	DCUB	DPARED	FI	KS
Present	2.	25.	0.	1.02	2.39	.59	15.4
	L	LAMBDA1	LAMBDA2	PEND	RAD	SIGMA	SW
Present	70.	80.e-3	.17	19.975	100.	.68	1.
	TH1	TH2	TINC	TINIC	TO	VSB	VTO
Present	28.5e-3	0.	0.	0.	0.	5.	1.65
	VTO	W					
Present	.47	10.					
Tables							
		1	2	3	4	5	6
Present	TABCUB	100.	95.	62.	46.	31.	21.
		7	8	9			
Present	TABCUB	16.	9.8	6.9			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABNMOS	.5	.83	1.	1.17	1.26	1.38
		7	8	9	10		
Present	TABNMOS	1.43	1.5	1.67	1.8		
		1	2	3	4	5	6
Present	TABPO	100.	69.	40.	22.	11.	5.9
		7	8	9			
Present	TABPO	2.9	1.5	.7			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABPLO	100.	68.	40.	23.	13.	7.
		7	8	9			
Present	TABPLO	3.8	2.	1.2			
Run specifications							
	LENGTH	SAVPER	DT				
Present	40	.5	.1				

Tabla 4.7 Datos para el programa de radiación, suponiendo incidencia de radiación perpendicular y variación en forma de rampa.

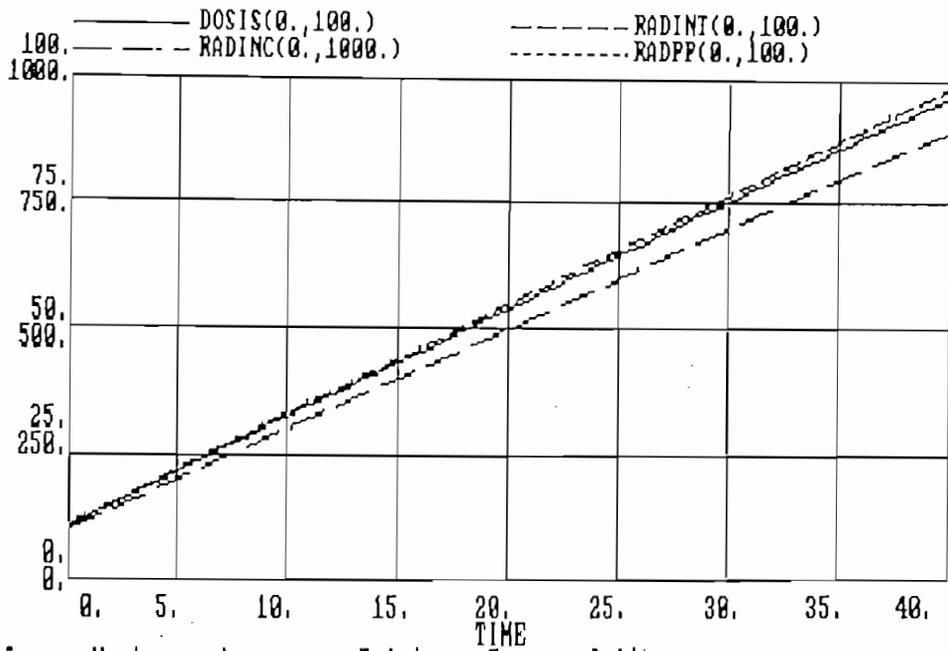


Figura 4.10 Niveles de radiación en varios puntos de un centro de cómputo, según los datos de la tabla 4.7.

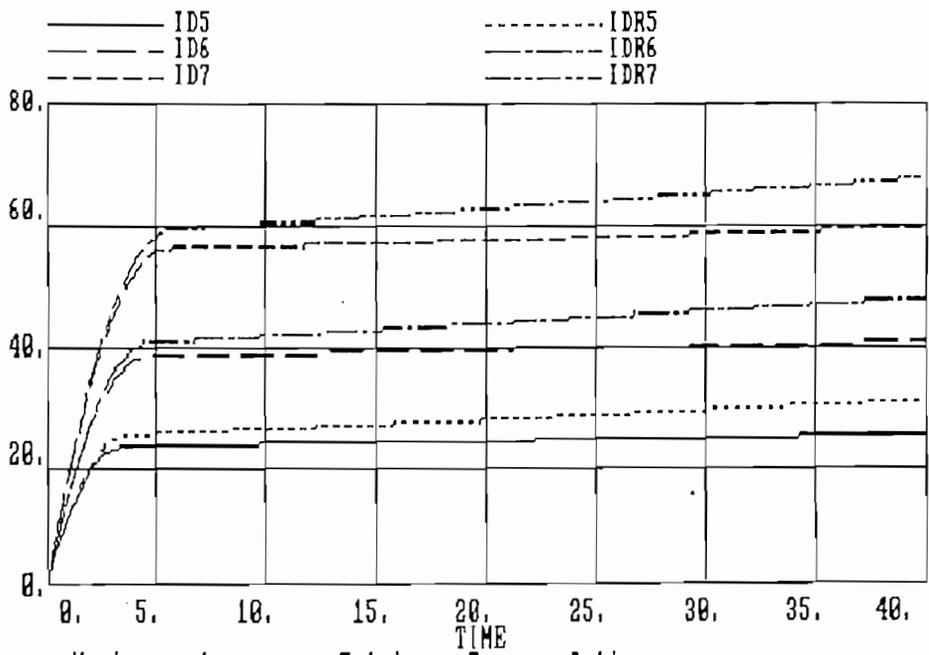


Figura 4.11 Curvas características de transistores MOS de un equipo, con y sin exposición a la radiación, según la tabla de datos 4.7.

## 4.2 SIMULACION DE SISTEMAS REALES.

Los resultados obtenidos de los programas de simulación, variando algunos datos se observan desde la figura 4.12 a la 4.22, y las tablas de datos, desde la tabla 4.8 a la 4.13. Los valores de entrada que se han cambiado, respecto a los indicados por las tablas de los ejemplos 1, 2, 3 y 4, se encuentran en negrilla y subrayados, en las tablas de datos para las simulaciones, que comprenden, del ejemplo 5 al 9.

Simulación para el centro de cómputo de PETROECUADOR

Ejemplo 5.- Con A)PROG\_1.

Los valores de entrada para los resultados indicados en las figuras 4.12 y 4.13 se encuentran en la tabla 4.8. La descripción de los datos de entrada, salida, y de las figuras son las mismas que se indican en el ejemplo 1. Las variantes, respecto al ejemplo 1, en los datos se encuentran en negrilla y subrayados en la tabla 4.8.

Ejemplo 6.- Con A)PROG\_1.

Los valores de entrada para los resultados indicados en las figuras 4.14 y 4.15 se encuentran en la tabla 4.9. La descripción de los datos de entrada, salida, y de las figuras son las mismas que se indican en el ejemplo 1. Las variantes, respecto al ejemplo 1, de los datos se encuentran en negrilla y subrayados en la tabla 4.9.

En los dos últimos ejemplos, la variación de los datos de entrada se dan principalmente en tres parámetros: tablas de capacitancia, carga sobre el cuerpo portador y el la intensidad de campo de ruptura del aire. Los resultados mantienen basicamente las mismas formas de onda pero con diferencias en cuanto a amplitud de las mismas y tiempo

		Parameters					
		Q1	VOLRAIR				
Present		1.e-6	30.				
		Tables					
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC11	<u>153.7</u>	<u>144.5</u>	<u>139.1</u>	<u>135.3</u>	<u>132.3</u>	<u>129.9</u>
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC11	<u>127.9</u>	<u>126.1</u>	<u>124.5</u>	<u>123.15</u>	<u>121.9</u>	<u>120.7</u>
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC11	<u>119.7</u>	<u>118.7</u>	<u>117.8</u>	<u>116.9</u>	<u>116.1</u>	<u>115.4</u>
		19	20	21			
Present	TABC11	<u>114.7</u>	<u>114.</u>	<u>113.4</u>			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC12	<u>-127.8</u>	<u>-118.6</u>	<u>-113.2</u>	<u>-109.4</u>	<u>-106.4</u>	<u>-104.</u>
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC12	<u>-102.</u>	<u>-100.2</u>	<u>-98.7</u>	<u>-97.3</u>	<u>-96.</u>	<u>-94.9</u>
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC12	<u>-93.8</u>	<u>-92.8</u>	<u>-91.9</u>	<u>-91.</u>	<u>-90.2</u>	<u>-89.5</u>
		19	20	21			
Present	TABC12	<u>-88.8</u>	<u>-88.1</u>	<u>-87.5</u>			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC22	<u>179.9</u>	<u>170.7</u>	<u>165.3</u>	<u>161.5</u>	<u>158.5</u>	<u>156.1</u>
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC22	<u>154.1</u>	<u>152.3</u>	<u>150.8</u>	<u>149.3</u>	<u>148.1</u>	<u>147.</u>
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC22	<u>145.9</u>	<u>144.9</u>	<u>144.</u>	<u>143.1</u>	<u>142.3</u>	<u>141.6</u>
		19	20	21			
Present	TABC22	<u>140.9</u>	<u>140.2</u>	<u>139.6</u>			
		Run specifications					
		DT	LENGTH	SAVPER			
Present		1.e-3	1.	5.e-3			

Tabla 4.8 Datos para la ejecución del programa de descarga electrostática, estado quasi - estático, para el ejemplo 5.

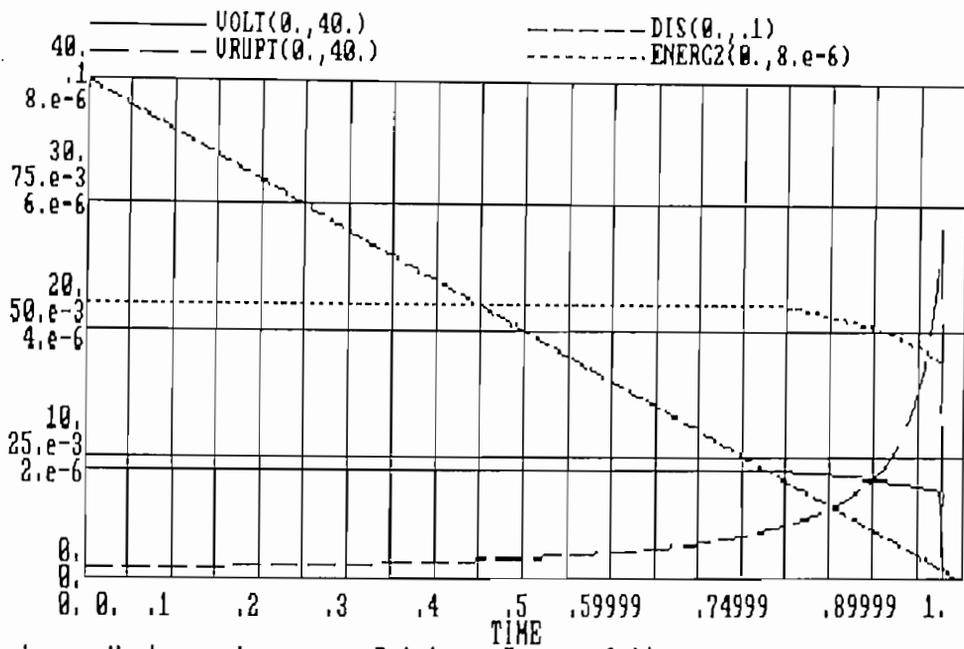


Figura 4.12 Resultados de A)PROG\_1 para los datos de la tabla 4.8, para un equipo con puesta a tierra.

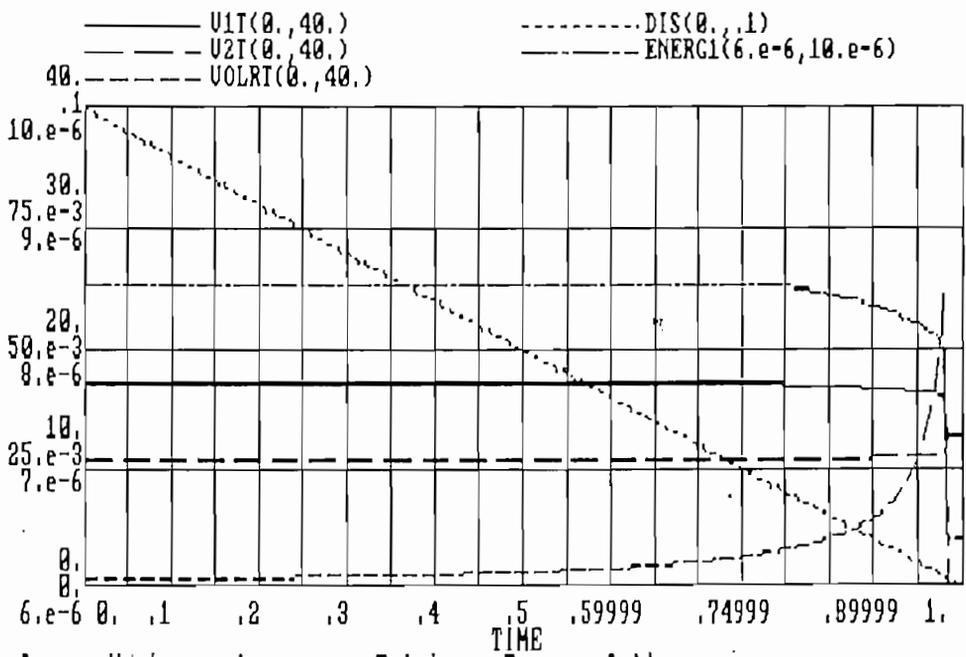


Figura 4.13 Resultados de A)PROG\_1 para los datos de la tabla 4.8, considerando que el equipo no tiene puesta a tierra.

		Parameters					
	Q1	VOLRAIR					
Present	<u>2.e-6</u>	<u>25.</u>					
		Tables					
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC11	<u>153.7</u>	<u>144.5</u>	<u>139.1</u>	<u>135.3</u>	<u>132.3</u>	<u>129.9</u>
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC11	<u>127.9</u>	<u>126.1</u>	<u>124.5</u>	<u>123.15</u>	<u>121.9</u>	<u>120.7</u>
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC11	<u>119.7</u>	<u>118.7</u>	<u>117.8</u>	<u>116.9</u>	<u>116.1</u>	<u>115.4</u>
		19	20	21			
Present	TABC11	<u>114.7</u>	<u>114.</u>	<u>113.4</u>			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC12	<u>-127.8</u>	<u>-118.6</u>	<u>-113.2</u>	<u>-109.4</u>	<u>-106.4</u>	<u>-104.</u>
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC12	<u>-102.</u>	<u>-100.2</u>	<u>-98.7</u>	<u>-97.3</u>	<u>-96.</u>	<u>-94.9</u>
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC12	<u>-93.8</u>	<u>-92.8</u>	<u>-91.9</u>	<u>-91.</u>	<u>-90.2</u>	<u>-89.5</u>
		19	20	21			
Present	TABC12	<u>-88.8</u>	<u>-88.1</u>	<u>-87.5</u>			
		1	2	3	4	5	6
Present	TABC22	<u>179.9</u>	<u>170.7</u>	<u>165.3</u>	<u>161.5</u>	<u>158.5</u>	<u>156.1</u>
		7	8	9	10	11	12
Present	TABC22	<u>154.1</u>	<u>152.3</u>	<u>150.8</u>	<u>149.3</u>	<u>148.1</u>	<u>147.</u>
		13	14	15	16	17	18
Present	TABC22	<u>145.9</u>	<u>144.9</u>	<u>144.</u>	<u>143.1</u>	<u>142.3</u>	<u>141.6</u>
		19	20	21			
Present	TABC22	<u>140.9</u>	<u>140.2</u>	<u>139.6</u>			
		Run specifications					
	DT	LENGTH	SAVPER				
Present	1.e-3	1.	3.e-3				

Tablas 4.9 Datos para la ejecución del programa de descarga electrostática, estado quasi - estable, para el ejemplo 6.

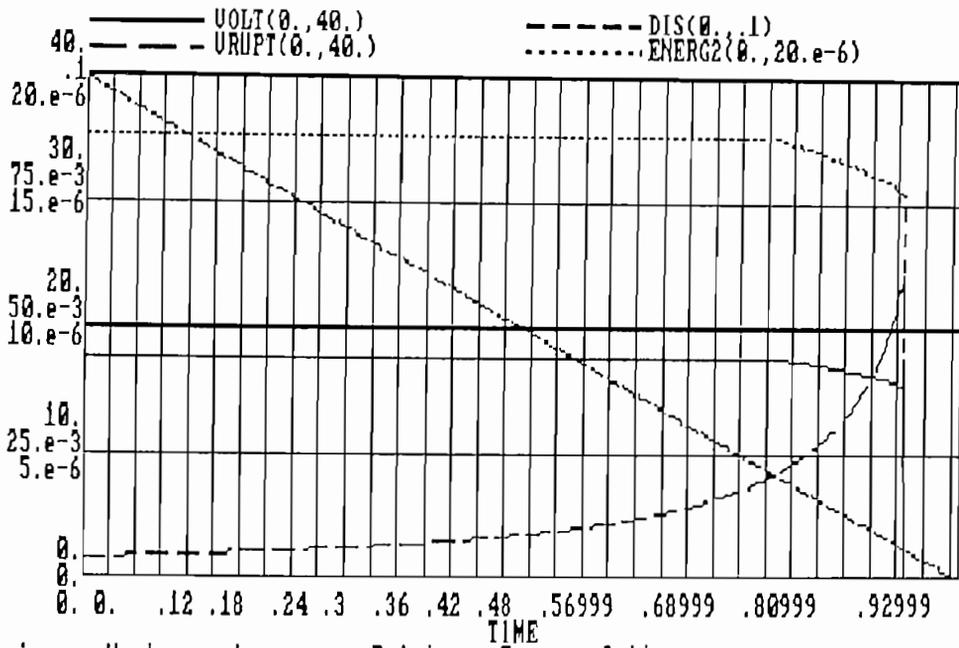


Figura 4.14 Resultados de A)PROG\_1 para los datos de la tabla 4.9, para un equipo con puesta a tierra.

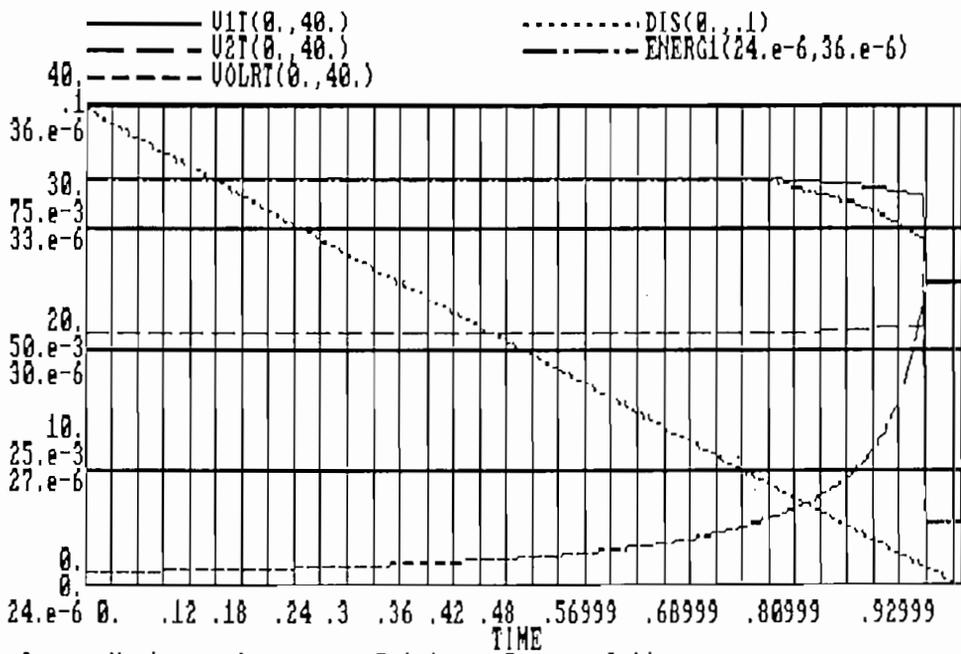


Figura 4.15 Resultados de A)PROG\_1 para los datos de la tabla 4.9, considerando que el equipo no tiene puesta a tierra.

transcurrido en presentarse el fenómeno de la ESD.

Ejemplo 7.- Con A)PROG\_2.

Los valores de entrada para los resultados indicados en las figuras 4.16 y 4.17 se encuentran en las tablas 4.10 y 4.11. La descripción de los datos de entrada, salida, y de las figuras son las mismas que se indican en el ejemplo 2. Las variantes, respecto al ejemplo 2, de los valores de entrada se encuentran en negrilla y subrayados en las tablas indicadas.

Ejemplo 8.- Con A)PROG\_2.

Los valores de entrada para los resultados indicados en las figuras 4.18 y 4.19 se encuentran en las tablas 4.12 y 4.13. La descripción de los datos de entrada, salida, y de las figuras son las mismas que se indican en el ejemplo 2. Las variantes, respecto al ejemplo 2, de los datos de entrada se encuentran en negrilla y subrayado en la tablas indicadas.

Los resultados, de los dos últimos ejemplos presentan las mismas formas de onda para voltajes y corrientes pero para el mismo caso, como por ejemplo I1 y I2 con el equipo a tierra en las figuras 4.16 y 4.18, la diferencia radica en la amplitud de los picos en las ondas, como se puede observar, I1 presenta picos de mayor amplitud en la figura 4.16. Este resultado indica que las amplitudes dependen de los parámetros que se han variado: coeficientes de capacidad y condiciones iniciales.

Parameters							
	C11	C12	C22	CASO	L1	L2	LG
Present	<u>141.80</u>	<u>-115.90</u>	<u>168.0</u>	2.	50.	50.	1.
	R1	R2	RG	V10	V20		
Present	1500.	500.	25.e-3	<u>7052.4</u>	0		
Run specifications							
	ABS_ERR	DT	LENGTH	NS_SEED	SAVPER		
Present	0.	50.e-12	.5e-6	0.	2.e-9		

Tabla 4.10 Datos para la ejecución del programa de análisis dinámico de la descarga electrostática, considerando el equipo con puesta de tierra.

Parameters							
	C11	C12	C22	CASO	L1	L2	LG
Present	<u>144.50</u>	<u>-118.60</u>	<u>170.7</u>	1.	50.	50.	0.
	R1	R2	RG	V10	V20		
Present	1500.	500.	0.	<u>16.10e3</u>	<u>11.20e3</u>		
Run specifications							
	ABS_ERR	DT	LENGTH	NS_SEED	SAVPER		
Present	0.	50.e-12	.5e-6	0.	2.e-9		

Tabla 4.11 Datos para la ejecución del programa de análisis dinámico de la descarga electrostática, considerando el equipo sin puesta de tierra.

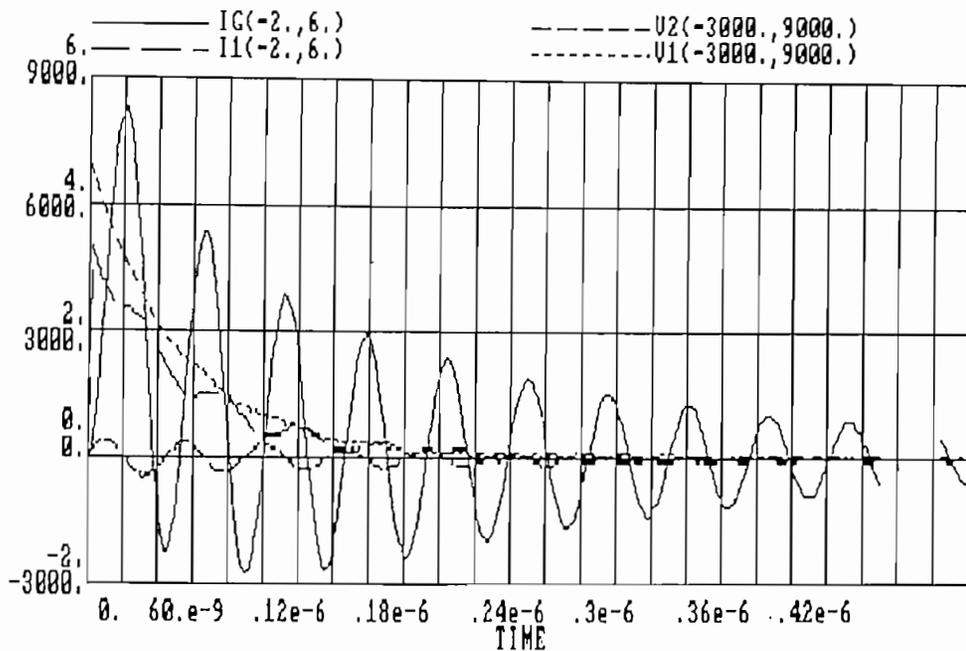


Figura 4.16 Curvas resultantes para los datos de la tabla 4.10. Las curvas representan voltajes y corriente el momento que se produce el ESD, con el equipo a tierra.

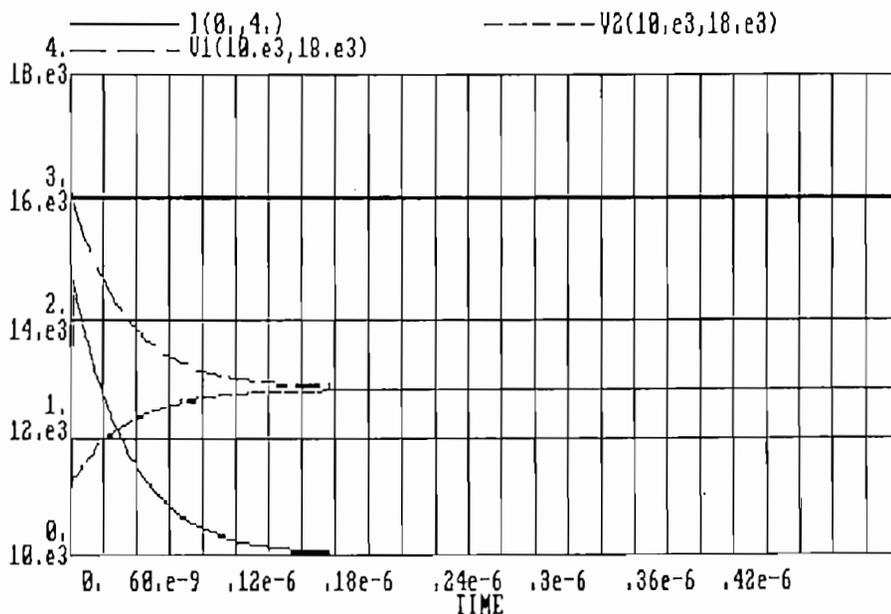


Figura 4.17 Curvas resultantes para los datos de la tabla 4.11. Las curvas representan voltajes y corriente el momento que se produce el ESD, con el equipo sin tierra.

Parameters							
	C11	C12	C22	CASO	L1	L2	LG
Present	<u>129.10</u>	<u>-103.20</u>	<u>155.30</u>	2.	50.	50.	1.
	R1	R2	RG	V10	V20		
Present	1500.	500.	25.e-3	<u>15.49e3</u>	0		
Run specifications							
	ABS_ERR	DT	LENGTH	NS_SEED	SAVPER		
Present	0.	50.e-12	.5e-6	0.	2.e-9		

Tabla 4.12 Datos para la ejecución del programa de análisis dinámico de la descarga electrostática, considerando el equipo con puesta de tierra.

Parameters							
	C11	C12	C22	CASO	L1	L2	LG
Present	<u>134.40</u>	<u>-108.5</u>	<u>160.6</u>	1.	50.	50.	0.
	R1	R2	RG	V10	V20		
Present	1500.	500.	0.	<u>32.73e3</u>	<u>22.12e3</u>		
Run specifications							
	ABS_ERR	DT	LENGTH	NS_SEED	SAVPER		
Present	0.	50.e-12	.5e-6	0.	2.e-9		

Tabla 4.13 Datos para la ejecución del programa de análisis dinámico de la descarga electrostática, considerando el equipo sin puesta de tierra.

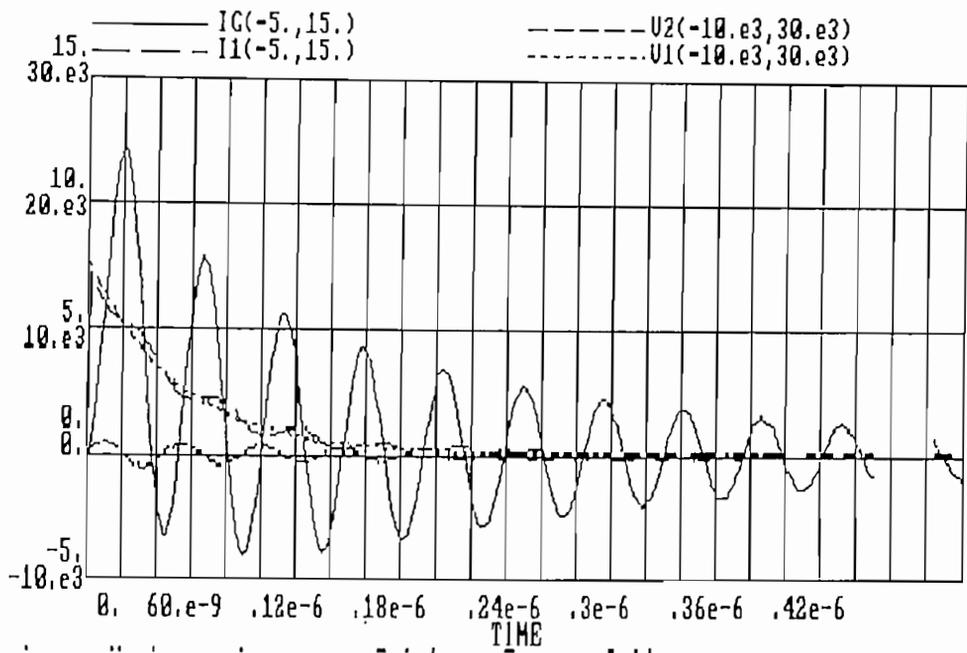


Figura 4.18 Curvas resultantes para los datos de la tabla 4.12. Las curvas representan voltajes y corriente el momento que se produce el ESD, con el equipo a tierra.

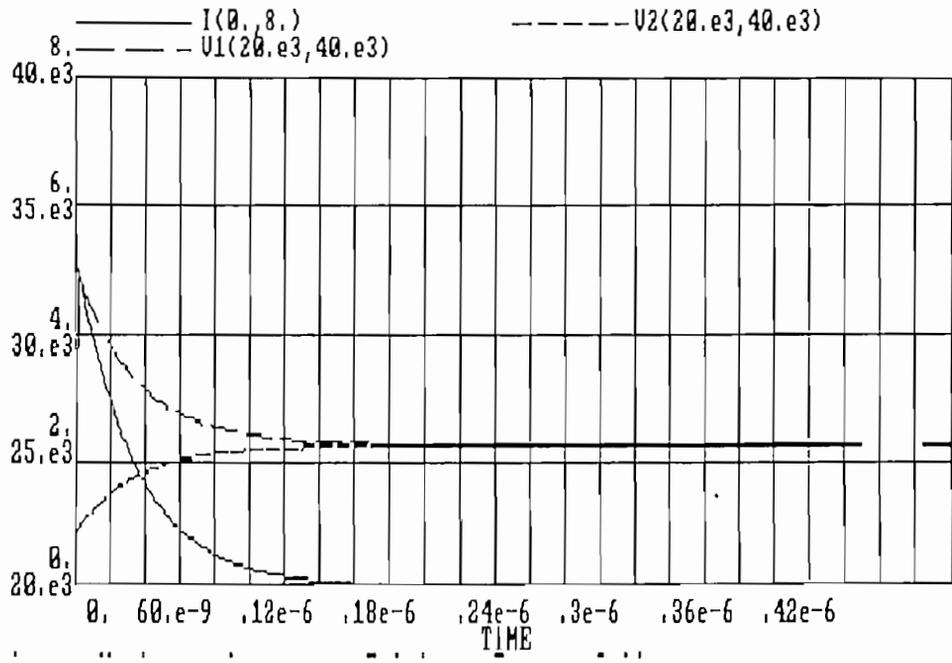


Figura 4.19 Curvas resultantes para los datos de la tabla 4.13. Las curvas representan voltajes y corriente el momento que se produce el ESD, con el equipo sin tierra.

Ejemplo 9. Con B)PROG\_3.

Los valores de entrada para los resultados indicados en las figuras 4.20, 4.21 y 4.22 se encuentran en las tablas 4.14 y 4.15. La descripción de los datos de entrada, salida, y de las figuras son las mismas que se indican en el ejemplo 3. Las variantes, respecto al ejemplo 3, de los datos de entrada se encuentran en negrilla en la tablas indicadas.

#### 4.3 CONCLUSIONES

Los programas del paquete desarrollado, pueden generar una gran cantidad de resultados, cambiando los diferentes parámetros de interés. En esta tesis solo se han variado los que se consideran de mayor relevancia en los medios estudiados. El programa a resultado ser verdaderamente versátil en cuanto a manejo de las variables de entrada y resultados, permitiendo realizar una infinidad de combinaciones. Sin embargo este presenta la inconveniencia de que no se permite al usuario escoger la escala en la que se realizaran los gráficos.

El lenguaje usado en la elaboración de los programas, presenta una gran sencillez en cuanto a su manejo, lo que ha permitido, como se puede observar en el apendice A, obtener una gran cantidad de resultados con pocas líneas de programación. Además ya sea con el menú que incluye la presente tesis o con el menú propio de lenguaje el manejo de ingreso de datos y visualización de resultados es bastante fácil y rápido.

Son varias las conclusiones que se pueden sacar de la simulación, pero cabe señalar que, muchas de estas fueron obtenidas del análisis de una gran cantidad de resultados,

Parameters							
	B_C	B_C1	B_K	B_K1	B_MASA	CAS01	D_INI_G
Present	10.e3	8000.	50.e3	<u>4000.</u>	<u>545e3</u>	1.	30.
	D_INT_G	D_MAG_G					
Present	1.	1.					
Run specifications							
	DT	LENGTH	SAVPER				
Present	50.e-3	120.	.4				

Tabla 4.14 Datos para el programa sobre golpe y vibración, cuando sobre el equipo se aplica un golpe.

Parameters							
	B_C	B_C1	B_K	B_K1	B_MASA	CAS01	CAS02
Present	10.e3	8000.	50.e3	<u>4000.</u>	<u>545e3</u>	0.	1.
	C_FRE_V	C_INI_V	C_INT_V	C_VIB_A	D_INI_G	D_INT_G	D_MAG_G
Present	60.	30.	30.	.1e-3	0.	0.	0.
Run specifications							
	DT	LENGTH	SAVPER				
Present	50.e-3	120.	.4				

Tabla 4.15 Datos para el programa sobre golpe y vibración, cuando sobre el equipo incide una onda vibratoria.

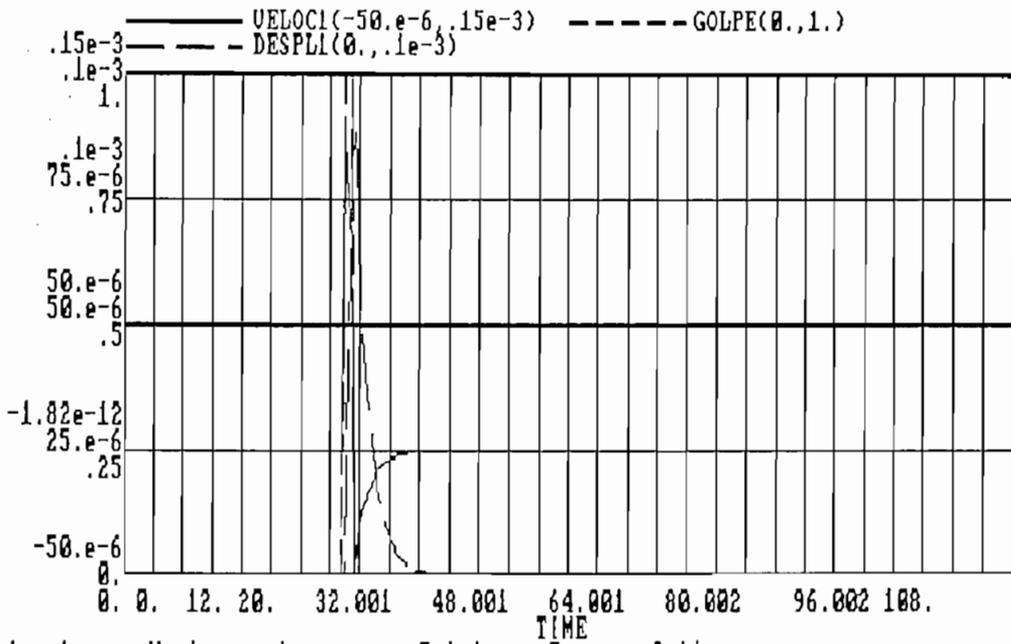


Figura 4.20 Formas de onda de respuesta en la cubierta y golpe de entrada para la tabla de datos 4.14.

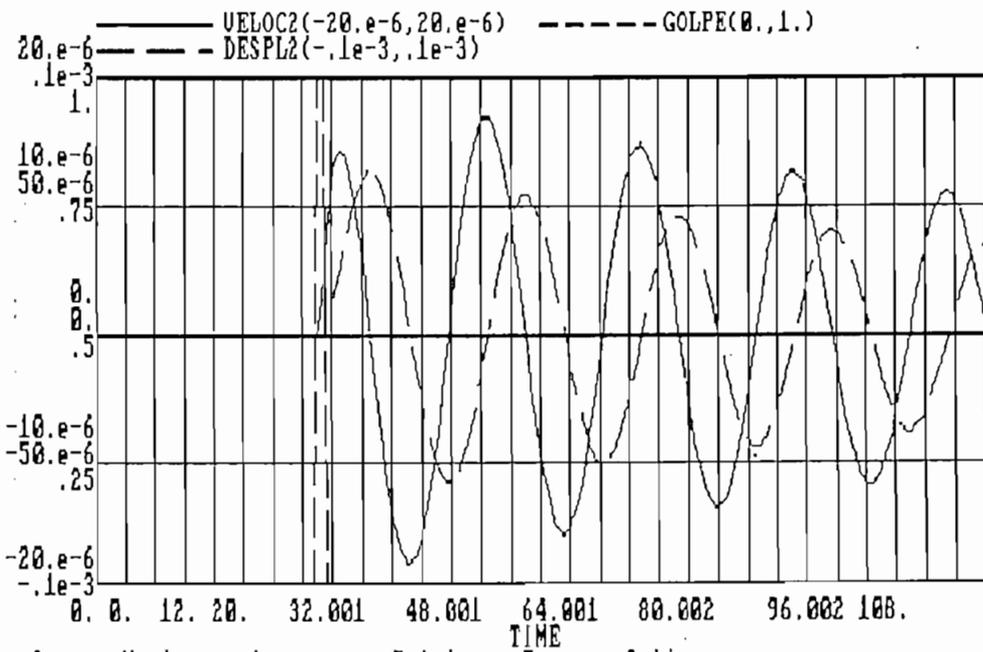


Figura 4.21 Formas de onda en el interior del equipo y golpe aplicado para los datos de la tabla 4.14.

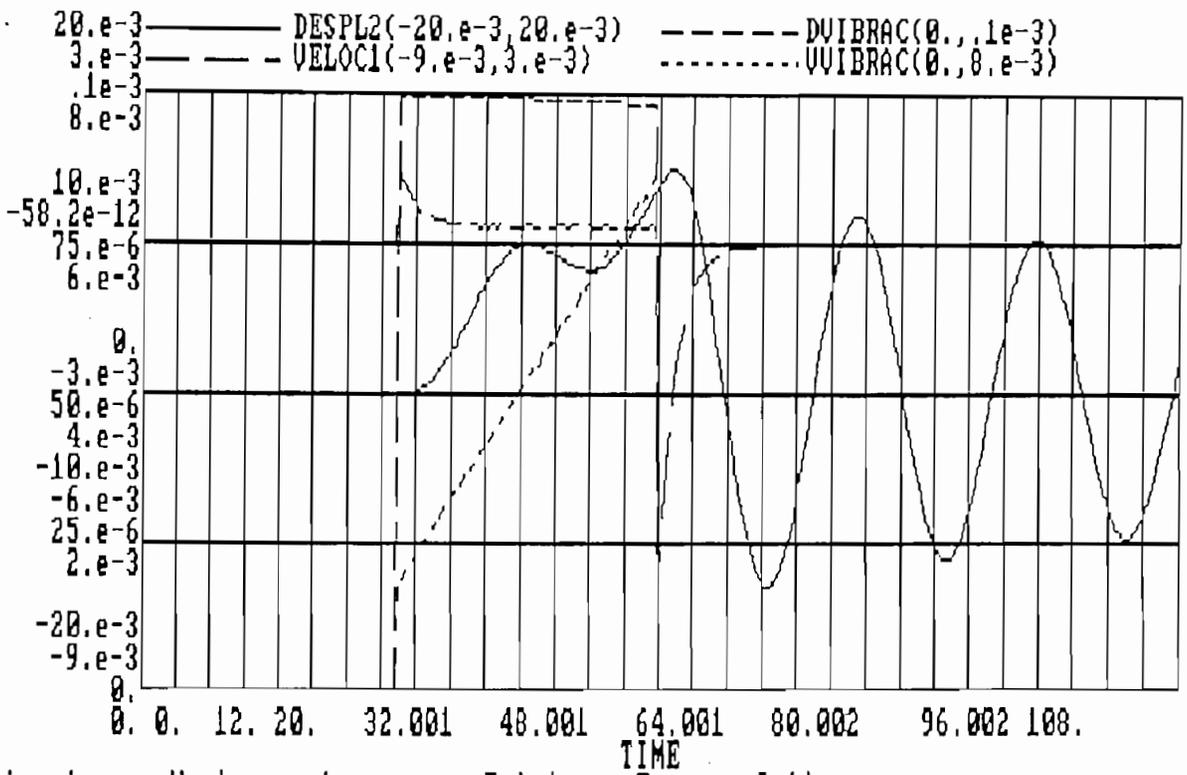


Figura 4.22 Respuesta de velocidad en la cubierta y desplazamiento en el interior de un equipo ante ondas vibratorias para los datos de la tabla 4.15.

de los cuales muy pocos se incluyen en el presente trabajo. De manera que si las conclusiones no se encuentran respaldadas por algún gráfico, esto no indica que tales conclusiones no estan basadas en un análisis científico, sino más bien indicará que los resultados no se han incluido en la presente tesis. A continuación se presentan las conclusiones sacadas de los resultados de la simulación:

- Como se puede observar de los resultados gráficos presentados en los ejemplos 1, 5 y 6, si el cuerpo cargado, posee una carga alta, los voltajes que se inducen sobre y sobre el equipo al que se aproxima son igualmente altos.

- Para dos equipos diferentes, los voltajes más altos, al momento de la descarga se presentan para el equipo cuyo radio equivalente es más pequeño, como se deduce de los resultados de los ejemplos 1, 5 y 6, por lo tanto los componentes electrónicos, sensibles a altos voltajes, en el mismo correran mayor riesgo de destrucción.

- Los resultados de los ejemplos 1, 5 y 6 indican que la energía en el momento de la descarga es mayor, cuando más alta es la carga que posee el cuerpo cargado, del mismo modo, la variación de energía disipada sobre los componentes en el momento de la descarga es función de la carga del cuerpo portador de ella, siendo esta mayor cuando mayor es la carga. Esto se cumple tanto para un equipo con puesta a tierra como para uno sin ella.

- Para dos equipos diferentes, la mayor diferencia de energía se presenta cuando el cuerpo cargado se descarga sobre el equipo de mayor radio equivalente.

- La variación del campo que puede soportar el aire, no afecta a los niveles de voltaje inducidos en los equipos, sino en la distancia a la cual la descarga se produce, de manera que para un mayor campo de ruptura del aire la

distancia cuerpo cargado - equipo será menor y viceversa.

- La corriente que circula sobre un equipo con puesta a tierra es más alta mientras más energía se disipe sobre el mismo, además los picos de voltaje involucrados en la respuesta transitoria, producto de la descarga, serán más elevados, como indican las figuras 4.3, 4.8 y 4.16.

- La forma de onda de corriente y voltaje, en la descarga, para un equipo sin puesta a tierra, como las indicadas por las figuras 4.4, 4.19 y 4.17, presentan una forma de onda claramente sobreamortiguada.

- Basado en los resultados presentados en los ejemplos 2, 7 y 8 para equipo con o sin puesta a tierra, se puede concluir que las corrientes más altas se producen para el sistema que involucra voltajes más altos, el momento que se produce el ESD.

- La forma de onda de la corriente sobre el lazo equipo - cuerpo cargado, como las indicadas en las figuras 4.3, 4.18 y 4.16, presentan una leve característica subamortiguada, mientras la corriente que circula por el lazo a tierra presenta una clara forma de onda subamortiguada. La forma de onda del voltaje sobre el cuerpo cargado presenta características sobreamortiguadas, mientras la forma de onda sobre el equipo presenta una forma de onda subamortiguada.

- De los resultados de los ejemplos 2, 7 y 8 se puede concluir que los picos de corriente que circulan sobre el sistema equipo - cuerpo cargado, son altas, pero sin embargo estas no afectaran al cuerpo cargado, si este corresponde al ser humano, ya que el tiempo de duración de los transitorios es bastante pequeño.

- Para el caso de un equipo con puesta a tierra, el voltaje sobre el equipo es cero pero durante la descarga se hace

diferente de cero, transitoriamente, como se puede observar de las figuras 4.3, 4.18 y 4.16.

- La variación de los coeficientes de amortiguamiento y elasticidad en la base de los equipos o de los aparatos colocados en esta para protegerlo, afectará la respuesta de el equipo ante golpe, vibración o golpe y vibración conjuntamente.

- Mientras mayor es la magnitud de golpes, vibraciones o golpes y vibraciones juntos, que inciden en un equipo, las oscilaciones son cada vez más amplias.

- La variación de los parámetros internos del equipo:  $c$  y  $k$  (Figura 3.14), no influyen en la amplitud de las oscilaciones sino en el tiempo de duración de las oscilaciones, como se puede apreciar en las figuras 4.8 y 4.22.

- El equipo responde a un golpe con vibraciones sobreamortiguadas en la cubierta y subamortiguadas en el interior, como se aprecia en las figuras 4.5 y 4.6.

- Al tiempo de inicio de la respuesta del golpe se producen pulsos de velocidad y aceleración, como se aprecia en la figura 4.5 y 4.20, estos pulsos pueden causar puntos de fatiga en los contactos entre los componentes electrónicos y el tablero impreso.

- En el caso que se apliquen vibraciones a la base, el equipo, responde con oscilaciones que presentan picos de mayor amplitud mientras más pequeños son los valores de  $k_1$  y  $c_1$ .

- La incidencia de un golpe y vibración conjuntamente, sobre un equipo antes que el mismo se logre estabilizar respecto a una de las dos entradas, produce en el equipo y sus componentes, desplazamientos, velocidades y aceleraciones con

picos más altos que para la incidencia de una de estas entradas solas, y en el caso de que la aplicación de estas excitaciones se presenten junto a la disminución de  $k$  y  $c$  (figura 3.14), el resultado sobre el equipo y sus componentes puede ser destructivo, ya que las oscilaciones además de ser de gran amplitud el tiempo de duración de estas es largo, como lo podemos observar en la figura 4.9.

- La incidencia de radiación sobre los semiconductores, desplaza las curvas características de los transistores, hacia altas corrientes de drenaje, como se puede observar en la figura 4.11, mientras más es la cantidad de radiación incidente.

- El uso de paredes blindadas o paredes de concreto más gruesas, reducirá considerablemente el nivel de radiación en el medio, y por lo tanto sobre los semiconductores.

BIBLIOGRAFIA

## Bibliografía

1. National Semiconductor Corporation, Cmos Databook, 1981
2. H. Keith Florig, The future battlefield: a blast of gigawatts?, IEEE Spectrum, Vol 25, N.3, Marzo 1988, pags 50-54.
3. Robert. J Antinone, How to prevent circuit zapping, IEEE Spectrum, Vol 24, N.4, Abril 1987, pags. 34-38.
4. Mark A Fischetti, Inherently safe reactors: They'd work if we'd let them, IEEE Spectrum, Vol. 24, N.3, Abril 1987, pags. 28-33.
5. Francois Martzloff, Protecting computer systems against power transients, IEEE Spectrum, Vol. 27, N.4, Abril 1990, pags. 37-40.
6. Bruel & Jaer, La medida de las vibraciones.
7. Bruel & Jaer, Monitoreo y análisis del estado de las máquinas.
8. IBM, 4341/4381 Installation Manual-Physical Planning, Capitulo 1.
9. Jacob Millman, Microelectrónica: Circuitos y sistemas analógicos y digitales, Tercera edición, Editorial Hispano-Europea, Barcelona.
10. John H. Chubb, Instrumentation and standards for testing static control materials, IEEE Trans. Ind. Appl, Vol. 26, N.6, Nov.-Dic. 1990, pags. 1182-1187.
11. A. Premali, M. L. Roshello, An analysis algorithm for

- thermal detectors of radiation, IEEE Trans. on Inst. and Meas., Vol. IM-35, N.4, Diciembre 1986, pags 612-618.
12. G. A. Girgis, K. H. Horn, G. Kruse, Measurement of mechanical vibrations using Eddy current transducer and simple digital demodulating techniques, IEEE Trans. on Ind. Elect., Vol. 35, N.1, Febrero 1988, pags. 135-140.
  13. Herbert Haselmann, Wolfgang Moritz, High-bandwidth control of the head-positioning mechanism in a winchester disk drive, IEEE Control Systems Mag., Vol. 7, N.5, Octubre 1987, pags. 15-19.
  14. John Reason, Vibration monitoring, Power Magazine, Vol. 129, N.9, Septiembre 1985, pags. S1-S12.
  15. John. Voelcker, Winchester disks reach for a gigabyte, IEEE Spectrum, Vol. 24, N.2, Febrero 1987, pags. 64-67.
  16. Instrumentation Society of America, ISA-SP71-C Draft Standard: Condiciones ambientales para sistemas de control y mediciones de procesos.
  17. Yasuyuki Tabata, Electrostatic properties of antistatic cloth woven partly with electrically conductive fiber, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol 24, N.21, Marzo-Abril 1988, pags 245-249.
  18. Charvaka Duvvury, Robert N. Rountree y Robert A. McPhee, ESD protection: Design and Layout Issues for VLSI Circuits, Trans. on Ind. Appl., Vol 26, N.1, Enero-Febrero 1989, pags. 41-47.
  19. Peter J. Wahle, Ronald D. Schrimpf, Kenneth F.

- Galloway, Simulated space radiation effects on power MOSFETs in switching power supplies, Trans. on Ind. Appl., Vol. 26, N.4, Julio-Agosto 1990, pags. 798-802.
20. William D. Greason, Review of the effect of electrostatic discharge and protection techniques for electronic systems, Trans. on Ind. Appl., Vol IA-23, N.2, Marzo-Abril 1987, pags. 205-216.
  21. William D. Greason, Concepts in modeling the effect of ESD in electronic systems, Trans. on Ind. Appl., Vol 24, N.1, Enero-Febrero 1988, pags. 86-92.
  22. William D. Greason, Influence of a ground plane on the ESD event in electronic systems, Trans. on Ind. Appl., Vol. 25, N.2, Marzo-Abril 1989, pags. 224-229.
  23. Richard J. Buschart, Computer grounding and the National Electrical Code, Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-23, N.31, Mayo-Junio 1987, pags. 404-407.
  24. Ralph H. Lee, Grounding of computers and other similar sensitive equipment, Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-23, N.31, Mayo-Junio 1987, pags. 408-411.
  25. Victor J. Maggolioli, Grounding and computer technology, Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-23, N.31, Mayo-Junio 1987, pags. 412-416.
  26. Donald W. Zipse, Grounding for process control computers and distributed control systems: The National Electrical Code and present grounding practice, Trans. on Ind. Appl., Vol. IA-23, N.31, Mayo-Junio 1987, pags. 417-421.
  27. Erik Hallen, Electromagnetic theory, Chapman & Hall, London, 1962.

28. T. J. Gutowsky, *Conceptos básicos de la teoría de vibraciones*, Editorial Litho Arias, Quito-Ecuador, 1972.
29. W. G. McLean, E. W. Nelson, *Teoría y problemas de mecánica técnica*, Segunda edición, 1976, McGraw Hill, Mexico.
30. John P. Bentley, *Principles of measurement systems*, Longman Scientific & Technical UK, Segunda Edición, 1983.
31. National Semiconductor Corporation, *The Reliability Handbook*, 1982.
32. G. Cardinali, S. Graffi, M Impronta, G. Massetti, DC MOSFET model for analogue circuit simulation employing process-empirical parameters, IEE Proc, Vol. 129, N.2, Abril 1982, pags. 61-66.
33. A. J. Pointon, *Piezoelectric devices*, IEE Proc, Vol 129, N.5, Julio 1982, pags. 285-304.
34. K. Y. Tong, AC model for MOS transistor for transient-current computations, IEE Proc, Vol. 130, N.1, Febrero 1983.
35. M. Morris Mano, *Logica digital y diseño de computadores*, Prentice-Hall Hispanoamericana Mexico, 1988.
36. Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de Control Moderno*, Prentice-Hall Hispanoamericana Mexico, 1988.
37. IAEA, *Radiation protection procedures*, Vienna, IAEA, 1973.

38. Robert G. Seippel, *Transducers, sensors and detectors*, Reston Publishing Company Inc, 1983.
39. Manual de uso del PROFESSIONAL DYNAMO PLUS.
40. Guayasamín, Julio C, *Tesis de grado*, 1991

APENDICE A : LISTADOS DE LOS PROGRAMAS USADOS

Al Listado del programa A)PROG\_1

```
*
* TESIS: SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y
* MECANICOS QUE AFECTAN A UN CENTRO DE
* COMPUTO
*
* AUTOR: LUIS ECHEVERRIA Y.
*
* PROGRAMA PARA EL ANALISIS QUASI-ESTATICO
* DEL COMPORTAMIENTO DE LA CARGA EN EQUIPOS
* DE UN CENTRO DE COMPUTO ANTE LA PRESENCIA
* DE UN CUERPO CARGADO.
.
* DEFINICION DE TABLAS

K TIME=0

A PC11.K=TABHL(TABC11,D.K,1,21,1)
T TABC11=160.9/151.0/145.3/141.2/138.1/135.5/133.3/131.4/
      129.8/128.3/126.9/125.7/124.6/123.5/122.6/121.7/
      120.8/120/119.3/118.5/117.9

A PC12.K=TABHL(TABC12,D.K,1,21,1)
T TABC12=-137.2/-127.3/-121.6/-117.5/-114.4/-111.8/-109.6/
      -107.7/-106/-104.5/-103.2/-102/-100.8/-99.8/-98.8/
      -97.9/-97.0/-96.2/-9 5.5/-94.8/-94.1

A PC22.K=TABHL(TABC22,D.K,1,21,1)
T TABC22=201.4/191.6/185.9/181.8/178.6/176.1/173.9/172/
      170.4/168.9/167.5/166.3/165.2/164.1/163.2/
      162.2/161.4/160.6/159.8/159.1/158.4

A D.K=10-2*TIME.K
A DIS.K=D.K/100

* CASO1: VOLTAJES PARA UN EQUIPO SIN PUESTA A TIERRA

A AUX.K=-PC12.K
A D1.K=(PC11.K-((AUX.K**2)/PC22.K))*1E-9
A V1.K=Q1/D1.K
A V2.K=-V1.K*PC12.K/PC22.K
A DIFV.K=V1.K-V2.K
A VOLR.K=(DIFV.K/DIS.K)/100
A VOLRT.K=FIFGE(VOLR.K,0,VOLRAIR,VOLR.K)
A ENERI.K=Q1*V1.K/2
A V1T.K=FIFGE(V1.K,VFINAL.K,VOLRAIR,VOLR.K)
A V2T.K=FIFGE(V2.K,VFINAL.K,VOLRAIR,VOLR.K)
A PUND.K=FIFGE(0,1,VOLRAIR,VOLR.K)
A CFINAL.K=(PC11.K+PC22.K+2*PC12.K)*1E-9
A CFINALT.K=FIFGE(0,CFINAL.K,VOLRAIR,VOLR.K)
A VFINAL.K=Q1*PUND.K/CFINAL.K
A EFINAL.K=Q1*VFINAL.K/2
```

```

A  ENERGI.K=FIFGE(ENERI.K,EFINAL.K,VOLRAIR,VOLR.K)
A  DIFVT.K=FIFGE(DIFV.K,0,VOLRAIR,VOLR.K)

*  CASO2: VOLTAJES PARA UN EQUIPO CON PUESTA A TIERRA

A  VPT.K=Q1/(PC11.K*1E-9)
A  Q2.K=PC11.K*1E-12*VPT.K*PUND2.K
A  ENERGI.K=Q1*VPT.K/2
A  VRUP.K=(VPT.K/DIS.K)/100
A  VRUPT.K=FIFGE(VRUP.K,0,VOLRAIR,VRUP.K)
A  ENERGI2.K=FIFGE(ENERGI.K,0,VOLRAIR,VRUP.K)
A  VOLT.K=FIFGE(VPT.K,0,VOLRAIR,VRUP.K)
A  PUND2.K=FIFGE(1,0,VOLRAIR,VRUP.K)

C  VOLRAIR=0,Q1=0

SAVE  PC11,PC12,PC22,D,V1T,V2T,DIFVT,ENERGI,DIS,VOLRT,VOLT,
      ENERGI2,VRUPT,Q2
SAVE  CFINALT,VFINAL

```

A2 Listado del programa A)PROG\_2

```
*
* TESIS: SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y
* MECANICOS QUE AFECTAN A UN CENTRO DE
* COMPUTO
*
* AUTOR: LUIS ECHEVERRIA Y.
*
* PROGRAMA PARA EL ANALISIS DINAMICO DEL
* COMPORTAMIENTO DE CORRIENTES Y VOLTA-
* JES GENERADOS DURANTE UNA DESCARGA E-
* LECTROSTATICA
*
K TIME=0

L V11.K=V11.J+DT*DV11.JK
K V11=V1C

L V21.K=V21.J+DT*DV21.JK
K V21=V2C

L V.K=V.J+DT*DV.JK
K V=V10-V20

L I11.K=I11.J+DT*DI11.JK
K I11=I10

L IG1.K=IG1.J+DT*DIG1.JK
K IG1=IG0

L IST.K=IST.J+DT*DIST.JK
K IST=I0

A IG.K=-IG1.K
A V2.K=FIFZE(V2F.K,-V21.K,SW)
A V1.K=FIFZE(V1F.K,V11.K,SW)
A I1.K=-I11.K
A I.K=-IST.K
A V2F.K=V20+V21.K
A V1F.K=V10-V11.K

LAS VARIABLES PARA EL CASO 1 SON V2,V1 E I Y PARA
EL CASO 2 LAS VARIABLES SON V2,V1,IG E I1

CASO 1 = PARA UN EQUIPO SIN PUESTA A TIERRA
CASO 2 = PARA UN EQUIPO CON PUESTA A TIERRA

R A1.KL=I11.K/C1
R A2.KL=(I11.K-IG1.K)/C2
R B1.KL=I.K/C1
R B2.KL=I.K/C2
R DI11.KL=((-V11.K-V21.K-I11.K*R)/L)*SW
```

```
R DIG1.KL=( (V21.K-IG1.K*RG) /LT) *SW
R DIST.KL=(- (V.K+IST.K*R) /L) * (1-SW)
R DV.KL=(IST.K/CEQ) * (1-SW)
R DV11.KL=FIFZE (B1.KL,A1.KL, SW)
R DV21.KL=FIFZE (B2.KL,A2.KL, SW)
```

```
K LT=FIFZE (1, LG, SW) *1E-6
K V1C=FIFZE (0, V10, SW)
K V2C=FIFZE (0, V20, SW)
K C1=(C11+C12) *1E-12
K C2=(C22+C12) *1E-12
K CEQ=(C1*C2) / (C1+C2)
K R=R1+R2
K L=(L1+L2) *1E-9
K SW=CASO-1
```

```
C C11=0, C22=0, C12=0, L1=0, L2=0, R1=0, R2=0, RG=0, LG=0
C V10=0, V20=0, I10=0, IG0=0, I0=0, CASO=0
```

```
SAVE I, I1, IG, V1, V2, V
```

A3 Listado del programa B)PROG\_3

\*  
\* TESIS: SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y  
\* MECANICOS QUE AFECTAN A UN CENTRO DE  
\* COMPUTO  
\*  
\* AUTOR: LUIS ECHEVERRIA Y.  
\*  
\* MODELO DE LA RESPUESTA DE UNA MAQUINA  
\* FRENTE A FENOMENOS MECANICOS  
\*  
\* CASO 1: GOLPE A LA CUBIERTA  
\* CASO 2: VIBRACION SINUSOIDAL  
\*

MACRO PULSO(FUERZ, TINIC, INTER)  
NOTE GENERACION DE UN PULSO  
NOTE FUERZ=AMPLITUD, TINIC=T0, INTER=DURACION

A PULSO.K=STEP (FUERZ, TINIC) -STEP (FUERZ, TINIC+INTER)

MEND

MACRO SENSOR(ACELER)  
NOTE COMPORTAMIENTO DEL SENSOR DE ACELERACION CON CRISTAL DE  
CUARZO  
INTRN Q, N, MS, T, D33, E33, A

A  $Q.K=N \cdot D33 \cdot MS \cdot ACELER.K$   
A  $SENSOR.K=Q.K \cdot T / (E33 \cdot A)$

K  $N=A\_N\_CRIS$   
K  $MS=\bar{A}\_MASA$   
K  $T=A\_ESPES$   
K  $D33=\bar{A}\_D33$   
K  $E33=\bar{A}\_E33$   
K  $A=A\_AREA$

C  $A\_MASA=0.01, A\_ESPES=0.001, A\_D33=2.31, A\_E33=4.68, A\_AREA=0.01$   
C  $A\_N\_CRIS=1$

MEND

PROGRAMA PRINCIPAL

K TIME=0

L  $Y1.K=Y1.J+DT \cdot VY1.JK$   
K  $Y1=Y10$

L  $Y2.K=Y2.J+DT \cdot VY2.JK$   
K  $Y2=Y20$

```

L  Y.K=Y.J+DT*VY.JK
K  Y=Y0

A  AMP.K=AMPL*EXP(-ATEN*TIME.K)
A  SEN.K=SIN(2*PI*FREC*TIME.K-DESF)
A  COSEN.K=COS(2*PI*FREC*TIME.K-DESF)
A  Y0.K=AMP.K*COSEN.K*CASO2*PULSO(1,TV,INV)
A  V0.K=-AMP.K*(2*PI*FREC*SEN.K+ATEN*COSEN.K)*CASO2*
      PULSO(1,TV,INV)
A  F1.K=F.K+K1*Y0.K+C1*V0.K
A  F.K=PULSO(FM,TG,INTG)*CASO1

R  VY1.KL=(F1.K-K1*Y1.K)/C1
R  VY2.KL=Y.K
R  VY.KL=-(K*Y2.K-K*Y1.K+C*Y.K-C*((F1.K-K1*Y1.K)/C1))/M

R  VELOC1.KL=VY1.KL
A  VELOC2.K=Y.K
A  DESPL1.K=Y1.K
A  DESPL2.K=Y2.K
A  ACELER2.K=VY.KL
A  DVIBRAC.K=Y0.K*PULSO(1,TV,INV)
A  VVIBRAC.K=V0.K*PULSO(1,TV,INV)
A  GOLPE.K=F.K
A  ACELEROM.K=SENSOR(ACELER2.K)

K  M=B_MASA
K  C=B_C
K  K=B_K
K  K1=B_K1
K  C1=B_C1
K  ATEN=B_D
K  AMPL=C_VIB_A
K  FREC=C_FRE_V
K  DESF=C_DESFAS
K  INV=C_INT_V
K  TV=C_INI_V
K  FM=D_MAG_G
K  TG=D_INI_G
K  INTG=D_INT_G
K  PI=B_PI

C  B_MASA=0,B_C=0,B_K=0,B_K1=0,B_C1=0,B_D=0,B_PI=3.1416
C  C_VIB_A=0,C_FRE_V=0,C_DESFAS=0,C_INT_V=0,C_INI_V=0
C  D_MAG_G=0,D_INI_G=0,D_INT_G=0,Y10=0,Y20=0,X0=0,CASO1=0,
      CASO2=0

SAVE  VELOC1,VELOC2,DESPL1,DESPL2,ACELER2,DVIBRAC,VVIBRAC,
      GOLPE,ACELEROM

```

A4 Listado del programa C)PROG\_4

\*  
\* TESIS: SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y  
\* MECANICOS QUE AFECTAN A UN CENTRO DE  
\* COMPUTO  
\*

\* AUTOR: LUIS ECHEVERRIA Y.  
\*

\* MODELO QUE SIMULA EL EFECTO DE LA RADIACION  
\* EN DISPOSITIVOS ELECTRONICOS DIGITALES  
\* POR MEDIO DEL ESTUDIO DE LA VARIACION DE  
\* LAS CARACTERISTICAS EN LOS TRANSISTORES  
\* CMOS QUE LO CONFORMAN.  
\*

TABLAS DE TRANSMISIBILIDAD DE RADAICION EN %  
PARA INCIDENCIA PERPENDICULAR A LA PARED .

A PARED0.K=TABXT(TABP0,ANPAR.K,0,20,2.5) EN PULGADAS  
T TABP0=100/69/40/22/11/5.9/2.9/1.5/0.7

A PLOMO0.K=TABXT(TABPLO,ANPLO.K,0,8,1) EN PULGADAS  
T TABPLO=100/68/40/23/13/7/3.8/2/1.2

A CUB0.K=TABXT(TABCUB,ANCUB.K,0,20,2.5) EN PULGADAS  
T TABCUB=100/95/62/46/31/21/16/9.8/6.9

TABLA DE VARIACION DE VT

A NMOS.K=TABXT(TABNMOS,DOSIS.K,100,1000,100)  
T TABNMOS=0.5/0.83/1/1.17/1.26/1.38/1.43/1.5/1.67/1.8

MACRO ID(VGS)

NOTE COMPORTAMIENTO NORMAL DE ID

INTRN VDS,VGT,VTS,LAMBDA,DENBETA,BETA,D1,VDSAT,IDA,IDB

A VDS.K=RAMP(1,TO)

N VGT=VGS-VTS

N VTS=VTO+SIGMA\*(SQRT(VSB+FI)-SQRT(FI))

N LAMBDA=LAMBDA2/(L\*(1+LAMBDA1\*VGT))

N DENBETA=1+(TH1+TH2/L)\*VGT

N BETA=2\*KS\*W/(DENBETA\*L)

N D1=1-SQRT(1+(LAMBDA\*\*2\*VGT\*VGT))

N VDSAT=VGT+D1/LAMBDA

A IDA.K=BETA\*VDS.K\*(VGT-VDS.K/2)

A IDB.K=BETA\*(1+LAMBDA\*(VDS.K-VDSAT))\*VDSAT\*(VGT-VDSAT/2)

A ID.K=FIFGE(IDA.K,IDB.K,VDSAT,VDS.K)

C W=10,L=70,VSB=5,VTO=0.47,KS=15.40,SIGMA=0.68,FI=0.59

C LAMBDA1=0.08,LAMBDA2=0.17,TH1=2.85E-2,TH2=0,TO=0

MEND

MACRO IDR(RVGS,VTS)

NOTE COMPORTAMIENTO DE ID EN MEDIO RADIATIVO  
INTRN VDS, VGT, LAMBDA, DENBETA, BETA, DI, VDSAT, IDA, IDB

A VDS.K=RAMP (1, TO)  
A VGT.K=RVGS-VTS.K  
A LAMBDA.K=LAMBDA2 / (L \* (1+LAMBDA1\*VGT.K))  
A DENBETA.K=1+ (TH1+TH2/L) \*VGT.K  
A BETA.K=2\*KS\*W / (DENBETA.K\*L)  
A DI.K=1-SQRT (1+ (LAMBDA.K\*\*2\*VGT.K\*VGT.K))  
A VDSAT.K=VGT.K+DI.K/LAMBDA.K  
A IDA.K=BETA.K\*VDS.K\* (VGT.K-VDS.K/2)  
A IDB.K=BETA.K\* (1+LAMBDA.K\* (VDS.K-VDSAT.K)) \* (VDSAT.K\*  
 (VGT.K-VDSAT.K/2))  
A IDR.K=FIFGE (IDA.K, IDB.K, VDSAT.K, VDS.K)

MEND

PROGRAMA PRINCIPAL

A ANPAR.K=ANCHOP\*DPARED/5.969  
A ANPLO.K=ANPLOI/2.54  
A ANCUB.K=ANCHOBC\*DCUB/2.3368  
  
A RADINC1.K=STEP (RAD, TINC)  
A RADINC2.K=RAD+RAMP (PEND, TINIC)  
A RADINC.K=FIFZE (RADINC1.K, RADINC2.K, SW)  
  
A RADPP.K=RADINC.K\*PARED0.K/100  
A RADINT.K=RADPP.K\*PLOMO0.K/100  
A DOSIS.K=RADINT.K\*CUB0.K/100  
  
C DPARED=2.39, ANCHOP=25, ANPLOI=0, DCUB=1.02, ANCHOBC=2  
C RAD=100, TINC=0, SW=1  
C PEND=19.975, TINIC=0, VT0=1.65  
  
A VT.K=VT0-NMOS.K  
  
A ID5.K=ID (5)  
A IDR5.K=IDR (5, VT.K)  
  
A ID6.K=ID (6)  
A IDR6.K=IDR (6, VT.K)  
  
A ID7.K=ID (7)  
A IDR7.K=IDR (7, VT.K)  
  
SAVE RADINC, RADPP, RADINT, DOSIS, ID5, IDR5, ID6, IDR6, ID7, IDR7

A5 Listado del programa para el cálculo de los coeficientes de capacitancia y autocapacitancia para el modelo de dos esferas.

El presente programa ha sido corrido en dos lenguajes: en SBASIC para un computador COMMODORE 64C y en QBASIC Versión 4.00 de Microsoft Corp. para un PS/2 Modelo 70 de IBM. El presente listado corresponde a la segunda versión.

```
DECLARE FUNCTION sh (X)
REM
REM CALCULO DE COEFICIENTES DE CAPACITANCIA
REM

inicio:
CLS : CLEAR
DIM dist(60)
DIM c11(60)
DIM c12(60)
DIM c22(60): X = 1: Y = 15: COLOR 12, 1
LOCATE X, Y: PRINT "
"
LOCATE X + 1, Y: PRINT " CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE
CAPACITANCIA PARA "
LOCATE X + 2, Y: PRINT " UN SISTEMA DE DOS ESFERAS DE
RADIOS A Y B "
LOCATE X + 3, Y: PRINT "
"
LOCATE X + 4, Y: PRINT " LUIS ECHEVERRIA Y.
"
LOCATE X + 5, Y: PRINT "
"

COLOR 0, 0
PRINT : COLOR 11
PRINT " Ingrese los datos del sistema:"
PRINT : COLOR 9: PRINT " Radio A = "; : COLOR 7: INPUT "", a
COLOR 9: PRINT " Radio B = "; : COLOR 7: INPUT "", b
COLOR 9: PRINT " Error = "; : COLOR 7: INPUT "", er
PRINT : COLOR 15: PRINT " Desea grabar los datos .. (S)i/(N)o"

repeti: desc$ = INKEY$: IF desc$ = "" THEN GOTO repeti

IF (desc$ = "s") OR (desc$ = "S") THEN
COLOR 9: PRINT " Nombre del archivo de datos = "; : COLOR 7:
INPUT "", arch$: grabar$ = "si"
ELSE
esp = 1
END IF

GOSUB varios
```

```

FOR j = 1 TO n

d = dist(j)

EO = 8.85E-12: C = a + b + d: S1 = 0: S2 = 0: S3 = 0: i = 0: pi
= 3.1416

K = (C ^ 2 - a ^ 2 - b ^ 2) / 2 / a / b: al = LOG(K + SQR(K ^ 2
- 1))
F = 4 * pi * EO * a * b * sh(al)

coeficiente1:

i = i + 1: XN = b * sh(i * al) + a * sh((i - 1) * al): XN = 1
/ XN: S1 = S1 + XN
IF ABS(S1 - SA) < er THEN i = 0: GOTO coeficiente2
SA = S1: GOTO coeficiente1

coeficiente2:

i = i + 1: ZN = a * sh(i * al) + b * sh((i - 1) * al): ZN = 1 /
ZN: S3 = S3 + ZN
IF ABS(S3 - SA) < er THEN i = 0: GOTO coeficiente3
SA = S3: GOTO coeficiente2

coeficiente3:

i = i + 1: YN = 1 / sh(i * al): S2 = S2 + YN
IF ABS(S2 - SA) < er THEN i = 0: GOTO store
SA = S2: GOTO coeficiente3

store:

k1 = F * S1: k2 = -F * S2 / C: k3 = F * S3
c11(j) = k1: c12(j) = k2: c22(j) = k3

NEXT j

IF grabar$ = "si" THEN GOSUB sdisco

resultados:

IF n = 1 THEN
    LOCATE 8, 40: COLOR 14: PRINT "Resultados:"
    LOCATE 10, 40: COLOR 15: PRINT "C11 ="; : COLOR 7:
    PRINT k1; : COLOR 15: PRINT "F"
    LOCATE 11, 40: COLOR 15: PRINT "C11 ="; : COLOR 7:
    PRINT k1 * 1E+12; : COLOR 15: PRINT "pF"
    LOCATE 13, 40: COLOR 15: PRINT "C12 ="; : COLOR 7:
    PRINT k2; : COLOR 15: PRINT "F"
    LOCATE 14, 40: COLOR 15: PRINT "C12 ="; : COLOR 7:
    PRINT k2 * 1E+12; : COLOR 15: PRINT "pF"
    LOCATE 16, 40: COLOR 15: PRINT "C22 ="; : COLOR 7:
    PRINT k3; : COLOR 15: PRINT "F"
    LOCATE 17, 40: COLOR 15: PRINT "C22 ="; : COLOR 7:

```

```

PRINT k3 * 1E+12; : COLOR 15: PRINT "pF"
PRINT : PRINT

ELSE

LOCATE 8, 40: COLOR 14: PRINT "Resultados:"
FOR i = 1 TO n:
LOCATE 10, 40: COLOR 12: PRINT "Distancia = "; : COLOR
7: PRINT dist(i)
LOCATE 12, 40: COLOR 15: PRINT "C11 ="; : COLOR 7:
PRINT CSNG(c11(i)); : COLOR 15: PRINT "F"
LOCATE 13, 40: COLOR 15: PRINT "C11 ="; : COLOR 7:
PRINT CSNG(c11(i) * 1E+12); : COLOR 15: PRINT "pF"
LOCATE 15, 40: COLOR 15: PRINT "C12 ="; : COLOR 7:
PRINT CSNG(c12(i)); : COLOR 15: PRINT "F"
LOCATE 16, 40: COLOR 15: PRINT "C12 ="; : COLOR 7:
PRINT CSNG(c12(i) * 1E+12); : COLOR 15: PRINT "pF"
LOCATE 18, 40: COLOR 15: PRINT "C22 ="; : COLOR 7:
PRINT CSNG(c22(i)); : COLOR 15: PRINT "F"
LOCATE 19, 40: COLOR 15: PRINT "C22 ="; : COLOR 7:
PRINT CSNG(c22(i) * 1E+12); : COLOR 15: PRINT "pF"
COLOR 28: LOCATE 23, 1: PRINT " Presione cualquier
tecla para continuar"
lazo3: IF INKEY$ <> "" THEN GOTO continue ELSE GOTO lazo3
continue: NEXT i: COLOR 15, 0

END IF

GOSUB impresion

LOCATE 23, 1: COLOR 15: PRINT " Otro cálculo.....(S/N)
"

lazo:

a$ = INKEY$

IF (a$ = "S") OR (a$ = "s") THEN
GOTO inicio
ELSE
IF (a$ = "n") OR (a$ = "N") THEN END
END IF

GOTO lazo

impresion:

LOCATE 23, 1: COLOR 15: PRINT " Desea resultados
impresos.....S/N
"
laz:
a$ = INKEY$
IF (a$ = "S") OR (a$ = "s") THEN
LOCATE 23, 1: COLOR 15: PRINT " Prepare la impresora y
presione cualquier tecla para continuar"
co: IF INKEY$ <> "" THEN GOTO pinic ELSE GOTO co

```

```

ELSE
    IF (a$ = "n") OR (a$ = "N") THEN RETURN
END IF
GOTO laz
pinic:
IF n = 1 THEN

    LPRINT "Datos:"
    LPRINT "Radio de la esfera A ="; a
    LPRINT "Radio de la esfera B ="; b
    LPRINT "Error ="; er
    LPRINT
    LPRINT : LPRINT "Resultados:"
    LPRINT : LPRINT "C11 ="; k1; "F"
    LPRINT "C11 ="; k1 * 1E+12; "pF"
    LPRINT : LPRINT "C12 ="; k2; "F"
    LPRINT "C12 ="; k2 * 1E+12; "pF"
    LPRINT : LPRINT "C22 ="; k3; "F"
    LPRINT "C22 ="; k3 * 1E+12; "pF"

ELSE

    LPRINT "Datos:"
    LPRINT "Radio de la esfera A ="; a
    LPRINT "Radio de la esfera B ="; b
    LPRINT "Error ="; er
    LPRINT
    LPRINT : LPRINT "Resultados:"
    LPRINT
    LPRINT "distancia ";
    LPRINT "      C11 (pF)      ";
    LPRINT "      C12 (pF)      ";
    LPRINT "      C22 (pF)      "
    LPRINT
    FOR i = 1 TO n
    LPRINT CSNG(dist(i)); TAB(16); CSNG(c11(i) * 1E+12);
    TAB(38); CSNG(c12(i) * 1E+12); TAB(60); CSNG(c22(i) *
    1E+12)
    NEXT i

END IF
RETURN

varios:
COLOR 15: PRINT " Una o varias distancias ?.. U/V "
repet: desc$ = INKEY$: IF desc$ <> "" THEN GOTO lazol ELSE GOTO
repet
lazol: IF esp = 1 THEN PRINT

IF (desc$ = "u") OR (desc$ = "U") THEN
    n = 1: PRINT
    COLOR 9: PRINT " Distancia entre esferas = "; : COLOR
    7: INPUT "", dist(1)
    RETURN

ELSE
    IF (desc$ = "v") OR (desc$ = "V") THEN

```

```

        PRINT : COLOR 9: PRINT " Número de distancias =
"; : COLOR 7: INPUT "", n
    FOR i = 1 TO n
    LOCATE 19, 1: COLOR 9
    PRINT " Distancia No"; : COLOR 11: PRINT i; :
    COLOR 9
    PRINT "="; : COLOR 7: INPUT " ", dist(i)
    NEXT i
    RETURN
    END IF
END IF

REM ***** rutina de grabado de datos *****

sdisco:
c11$ = arch$ + ".c11"
c12$ = arch$ + ".c12"
c22$ = arch$ + ".c22"
OPEN "o", #1, c11$
OPEN "o", #2, c12$
OPEN "o", #3, c22$
FOR i = 1 TO n
PRINT #1, CSNG(c11(i))
PRINT #2, CSNG(c12(i))
PRINT #3, CSNG(c22(i))
NEXT i
CLOSE #1
CLOSE #2
CLOSE #3
RETURN

FUNCTION sh (u)
sh = (EXP(u) - EXP(-u)) / 2
END FUNCTION

```

APENDICE B: MANUAL DE USO

Los programas han sido desarrollados en un computador IBM PS/2 MODEL 70 386, a 20 MHz, con dos drives de 5¼ y 3½, con disco duro. Para ejecutar los programas no se requiere de coprocesador. el sistema operativo bajo el cual se trabajo es el DOS 4.00 y el display del computador es un VGA (Video Graphics Array).

Usando el menú del PROFESSIONAL DYNAMO PLUS, se pueden correr los programas en cualquier computador IBM o compatible, pero que tenga un sistema operativo 3.00 o superior, pero usando el menú diseñado para la tesis se necesita que el sistema tenga el sistema operativo 4.00 o superior y la pantalla sea VGA.

#### D1 Usando el menu del PROFESSIONAL DYNAMO PLUS.

El programa de simulación usa las facilidades que nos presenta el lenguaje de simulación PROFESSIONAL DYNAMO PLUS.

Este paquete consta de 4 bloques bien definidos: editor, compilador, simulador y presentador de resultados. Los programas realizados estan ya editados y compilados de manera que lo único que nos interesa son el simulador y la presentación de resultados.

Para entrar a la simulación del programa, existen dos caminos: usar el programa PROFESSIONAL DYNAMO por medio de PD.COM o usar solo el PROFESSIONAL DYNAMO SIMULATOR por medio del archivo SMLT.COM.

Siguiendo el primer camino, luego de una pantalla de presentación del paquete tenemos el siguiente menu:

#### Pantalla 1

```
Select command by arrows and Enter or by typing initial letter  
Commands:  Edit  Compile  Simulate  View  Document  Help  Quit
```

en la línea de comandos. Escogemos por medio de las teclas

para movimiento del cursor (flechas) o apretando la tecla de la inicial el comando Simulate. A continuación, se presenta una pantalla que contienen los cuatros programas junto al siguiente menú en la línea de comandos:

#### Pantalla 2

[Modelos]

Select model to simulate:        arrows        Enter        (Esc to none)

Una vez escogido el modelo, en la línea de comandos tendremos el siguiente menú:

#### Pantalla 3

Simulating (modelo) : Changes Save Go Preserve Resume Help Esc Quit

con la opción Change, el programa nos presenta una pantalla indicandonos las variables del programa y los valores colocados en el programa original, ésta es similar a lo siguiente:

#### Pantalla 4

```
----- Parameters -----  
      Lista de parámetros del modelo  
----- Run specifications -----
```

Especificaciones de arranque del modelo

Changes: Arrows Home End PgUp PgDn Values Enter for GTC Esc to cont

para cambiar los parámetros del modelo solo es necesario colocarse sobre la variable a cambiar y luego ingresar desde el teclado el nuevo valor, similar para las especificaciones de arranque. Ingresando por la segunda vía, esto es arrancando desde el DOS con el formato C:\DYNAMO\SMLT [modelo].SMT, solo obtendremos las pantallas 3 y 4.

El segundo bloque de la figura 3.33 se presenta una vez ingresado los parámetros, escogiendo el comando Save en la

pantalla 3, de la línea de menu tendremos entonces:

#### Pantalla 5

————— Rates and Auxiliares —————

Listado de variables de tasa y auxiliares

————— Levels —————

Listado de las variables de nivel usadas en el modelo  
Saving: Arrows Home End PgUp PgDn Enter to (un)save Esc to cont

Con el mismo criterio usado para cambiar los valores de las variables, indicamos cuales de estas seran grabadas, presionando Esc, el programa entonces desplegará la siguiente indicación en la línea de comandos:

#### Pantalla 6

Type run name or type Enter for: [nombre del modelo]

Al presionar Enter el modelo comenzará a simularse mientras el simulador del DYNAMO nos da información del tiempo de simulación en la línea de comando, de la siguiente forma:

#### Pantalla 7

Simulating [nombre del modelo] Esc to abort TIME =[tiempo]

Luego que el modelo se ha simulado, podemos mirar los resultados de la simulación en forma gráfica o tabular, para esto podemos usar dos opciones: si ingresamos por medio del PD.COM, podemos escoger en la pantalla 1 el comando View o desde el DOS ingresando C:\DYNAMO\VIEW [modelo].RSL.

Si se escogió la primera alternativa, posterior a la primera pantalla obtendremos un listado de los datos de los modelos que se pueden observar, y en la línea del menu tendremos:

Select run to view: arrows Enter (Esc to continue)

Con las teclas de movimiento del cursor escogemos el modelo que deseamos observar, y presionamos Esc, entonces el computador nos indicará las diferentes alternativas para observar los datos desplegando en la línea de comandos el siguiente aviso:

```
Viewing [modelo] : Plot Select_tabulate Tabulate_all Old Help Esc Quit
```

Escogiendo el comando Plot, podremos observar una gráfica de los resultados, el computador nos indicará una lista de todas las variables grabadas, por medio de las teclas de movimiento del cursor escogeremos hasta siete de las variables, las que podran ser observadas en una sola escala o en diferente escala. Para observar en escala diferente señalaremos la variable y presionaremos Enter y para observar a la misma escala, señalaremos la variable y presionaremos [>] para la primera variable y Enter para las demás, las mismas que se graficarán a la misma escala. En la línea de comandos, el programa indicará:

```
Select vars to plot: Arrows Home End PgUp PgDn Enter Esc to continue
```

para datos en gráficos o:

```
Select vars to tabulate: Arrows Home End PgUp PgDn Enter Esc to continue
```

para datos tabulares.

En el caso de optar por resultados gráficos, junto con los gráficos, la computadora nos indicará el siguiente menu:

```
View [Número de gráfico]: Next view_No Print Esc Quit
```

por medio del cual se puede tener resultados impresos de la respuesta en el tiempo para una o todas las variables del modelo.

Si escogemos la opción de datos tabulados, luego de pedirnos el intervalo con que se quiere observar los datos, a través de la indicación siguiente:

```
Type print interval or type Enter for: [intervalo de datos]
```

en la línea de comandos, nos desplegará, junto con los datos de la variable escogida, el siguiente menu:

```
[Valores de las variables]
```

```
View [Número de despliege]: Arrows Home End <Ctl>+ <Ctl>+ PgUp PgDn Next view_no Print Esc Quit
```

En este caso tambien se puede obtener resultados impresos de los valores que toman las variables.

D2 Por medio del menú diseñado para la presente tesis.

El menú diseñado para esta tesis, consta de varias pantallas. Para que se pueda usar este se necesita de un sistema operativo DOS 4.0 o superior, además de los programas: MENUP.EXE, MENU.BAT, SMLT.COM, VIEW.EXE, GRAPHICS.COM, COEF1.EXE, A)PROG\_1.SMT, A)PROG\_1.DAT, A)PROG\_1.INS, A)PROG\_2.SMT, A)PROG\_2.DAT, A)PROG\_2.INS, B)PROG\_3.SMT, B)PROG\_3.DAT, B)PROG\_3.INS, C)PROG\_4.SMT, C)PROG\_4.DAT, C)PROG\_4.INS y los archivos de datos ó resultados.

Al ejecutar el archivo MENU.BAT, se carga el programa MENUP.EXE y nos presenta la siguiente pantalla:

SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y MECANICOS  
QUE AFECTAN A UN CENTRO DE COMPUTO  
Luis Manuel Echeverría Yáñez

Menú Principal  
Simulación  
Resultados  
Coeficientes de capacidad  
Escape

Hay dos formas de escoger una opción, por medio de la letra resaltada sobre el teclado o moviendo la ventana sobre el menú por medio de las teclas de movimiento del cursor.

Si escogemos la primera opción obtendremos el siguiente menú:

SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y MECANICOS  
QUE AFECTAN A UN CENTRO DE COMPUTO  
Luis Manuel Echeverría Yáñez

Menú Modelos

Descarga electrostática

Golpe y Vibración

Radiación ionizante

Menú anterior

Si escogemos las opciones 2 ó 3, es como arrancar desde el sistema operativo con el formato C:\DYNAMO\SMLT [modelo].SMT. Para la explicación, de la forma de operar en el interior del Simulador del PROFESSIONAL DYNAMO PLUS, referirse al punto anterior.

Escogiendo la opción 1, obtendremos la pantalla siguiente:

SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y MECANICOS  
QUE AFECTAN A UN CENTRO DE COMPUTO  
Luis Manuel Echeverría Yáñez

Menú Descarga Electrostática

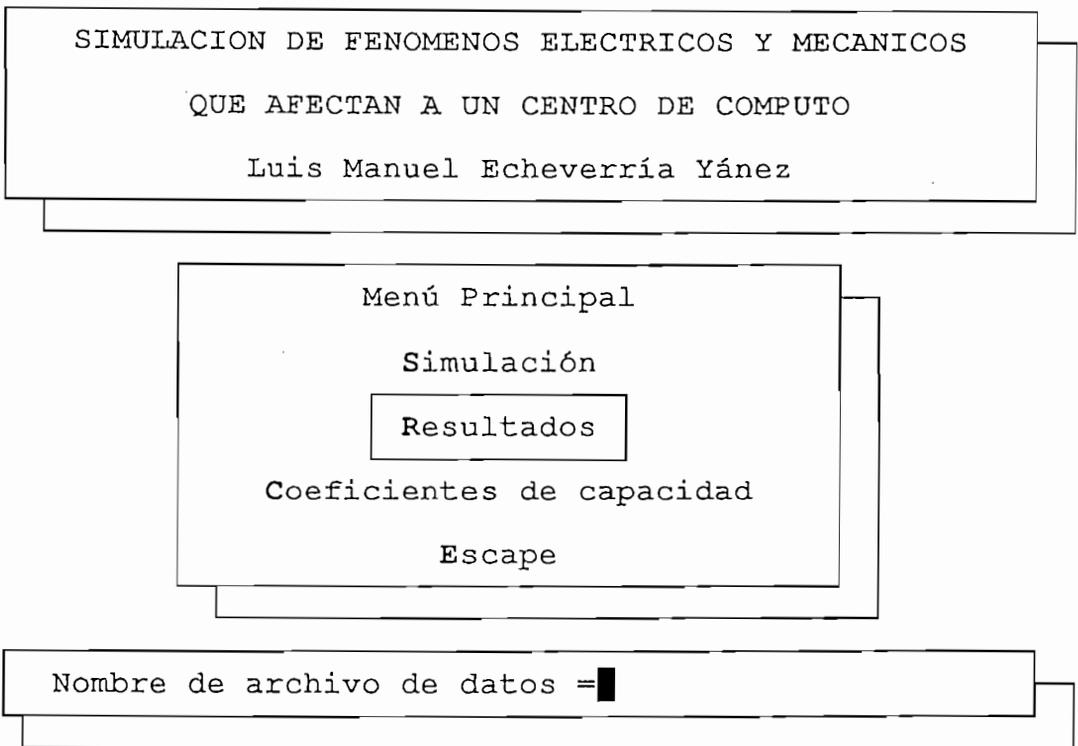
Análisis Quasi - estático

Análisis Dinámico

Menú anterior

De la misma manera que para las opciones 2 y 3 del anterior menú, escoger una de las dos opciones indicadas equivale a arrancar del DOS con el formato C:\DYNAMO\SMLT [modelo].SMT.

Al escoger Resultados del primer menú, se nos presentará la siguiente pantalla:



Como se observa, nos pregunta el programa por el nombre del archivo de datos. Una vez ubicado el nombre del archivo de datos el computador nos preguntará si se va a imprimir los resultados, como se indica en la pantalla 8. Si se responde afirmativamente, desde el teclado, se cargara el archivo GRAPHICS del sistema operativo, lo que nos permitirá obtener resultados impresos, si se responde no, los resultados no podran ser impresos. Posteriormente el programa ejecuta una acción similar a cargar el programa desde el DOS con el formato C:\DYNAMO\VIEW [modelo].RSL. Con los datos en el interior del Presentador de resultados del PROFESSIONAL

DYNAMO PLUS, este se comporta como se indicó en el punto anterior.

Pantalla 8

SIMULACION DE FENOMENOS ELECTRICOS Y MECANICOS  
QUE AFECTAN A UN CENTRO DE COMPUTO  
Luis Manuel Echeverría Yánez

Menú Principal  
Simulación  
Resultados  
Coeficientes de capacidad  
Escape

No  
Piensa imprimir los resultados..(S)i/(N)o

Adicionalmente a las facilidades de manejo de los datos, el menú desarrollado al presionar F1 nos da un listado de los archivos de resultados y presionando F2 nos da un listado de los archivos de datos en el disquete.

Finalmente, presionando Escape en el programa principal o la tecla ESC desde cualquier pantalla, se podrá salir del programa.

APENDICE C: MEDICION EXPERIMENTAL DE LOS COEFICIENTES DE  
CAPACIDAD PARA UN SISTEMA DE VARIOS EQUIPOS.

Las figuras C.1 y C.2 ilustran la forma como se miden experimentalmente los coeficientes de capacidad para un sistema de varias esferas.

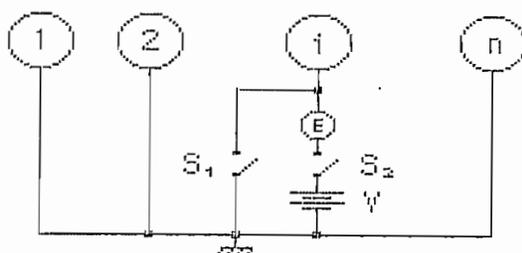


Figura C.1 Medición de  $C_{ii}$

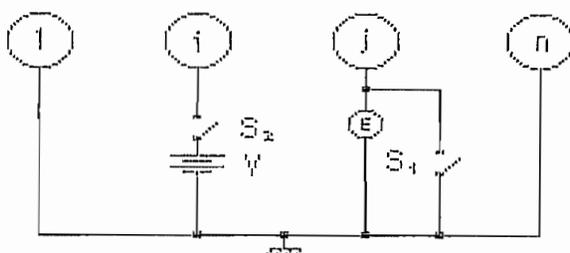


Figura C.2 Medición de  $C_{ij}$

Con el interruptor  $S_1$  abierto, cerramos  $S_2$ , esto aplica un voltaje  $V$  sobre el cuerpo, el electrometro  $E$  es usado para medir la carga en el cuerpo. Aplicando  $Q = CV$ , obtendremos para el caso de la figura C.1,  $C = C_{ii}$  y para el caso de la figura C.2,  $C = C_{ij}$ . La carga  $Q$  se puede medir con el electrómetro, como el Keithley modelo 610B y la fuente de voltaje es la Keithley modelo 240A.

APENDICE D: ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DE COMPUTACION  
DE PETROECUADOR Y LA ESCUELA POLITECNICA  
NACIONAL.

IBM 4381 Processor Model Groups 3, 14, 24, and 92E Dual Processor Specifications

Dimensions:

With Covers:	
Front	Side Height
min 1 640	815 1 790
(inches) (64-1/2) (32)	(70-1/2)

Covers Removed:	
Front	Side Height
1 525	750 1 775
(inches) (60)	(29-1/2) (70)

Service Clearances:

Front	Rear	Right	Left
1 070	1 070	1 070	1 070
(inches) (42)	(42)	(42)	(42)

Weight: 843 kg (1,855 lb)\*

For WT 30 Hz (and 60 Hz for Japan): 910 kg (2,005 lb)\*

\* Includes 18 kg (40 lb) of packing material.

Heat Output (maximum): 6 600 Watts (22,500 BTU/hr)

Airflow: 57 m<sup>3</sup>/min (2,013 cfm)

Power Requirements (50 and 60 Hz):

V A 7.2  
Phase 3

Volts:	Nominal	Minimum	Maximum
50 Hz	200	180	220
	220	193	238
	380	333	410
	400	350	432
	415	363	448

60 Hz	200	180	220
	208	180	220
	220	193	238
	240	208	254

Power Cord:

4.3 [optional, 1.8]  
meters (14) [optional, 6]  
(feet)

Power Cord Style: EI (See Appendix B.)

U.S.A. and Canada: (See Appendix F)

Plug R&S, 7328 (IBM Provided)

Receptacle R&S, 7324 (Customer Provided)

Connector R&S, 7428 (Customer Provided)

Note: If a 43XX processor is being replaced by a 4381 processor, a larger power requirement (receptacle/connector, service protection) is required.

Noise Emission Levels

For definitions see "Acoustics (Noise-Emission Levels)" on page 1-9.

Hz	Operating (bels)	Idling (db)	Operating (db)	Idling (db)
60	8.2	8.2	55.0	55.0

Operating Environment:

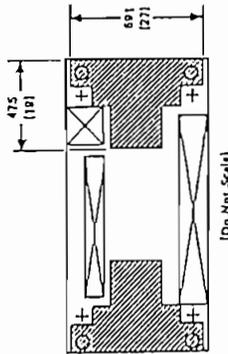
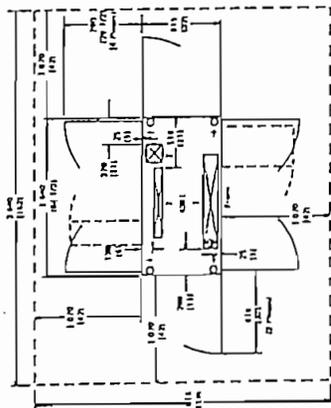
Temperature: 10-32°C (50-90°F)  
Relative Humidity: 8-80%  
Maximum Wet Bulb: 23°C (73°F)

Nonoperating Environment:

Temperature: 10-43°C (50-110°F)  
Relative Humidity: 8-80%  
Maximum Wet Bulb: 27°C (80°F)

Note: If the 4381 processor has to be shipped on its side or lifted, order pending RPQ number S00582.

Plan View (Metric Scale: 20 mm = 1 m)  
English measurements are shown in parentheses.



(Do Not Scale)

Cable Entry/ Exit Number	Dimensions (See Note 3)	
	Millimeters	Inches
1	160 x 984	6 x 39
2	176 x 188	7 x 7 1/4
3	80 x 735	3 x 29

Notes:

1. A console inble is available from IBM as an optional feature.
2. Entry/exit holes are measured from edge of frame, not the covers.
3. Cable entry/exit holes shown represent locations on the machine and do not necessarily represent or require a corresponding hole in the floor. Cables from more than one entry/exit hole may be consolidated in a given hole in the floor. If this is done, allow for the additional cable length that may be required. (See 2-14.)
4. Because the machine does not have skirts, cable exit points in nonraised-floor installations are restricted only by the location of the casters.



**SPECIFICATIONS**

**Dimensions:**

Front min (mm)	831 (33)	Slide (inches)	750 (30)	Height (mm)	1 000 (39)
----------------	----------	----------------	----------	-------------	------------

**Service Clearances:**

Front min (mm)	914 (36)	Rear min (mm)	914 (36)	Left min (mm)	0 (0*)
Weight	215 kg (470 lb)				
Heat Output	1 100 W (3 700 BTU/hr)				
Airflow	6 m <sup>3</sup> /min (200 cfm)				

**Acoustical Data:**

For definitions, see "Acoustics" in Chapter 3 of *IBM General Information Manual: Installation Manual—Physical Planning, GC22-7072*.

Operating (hels)	7.1	6.1	$< L_{pA} > m$	
			Operating (dB)	Idle (dB)
			56.0	48.0
			No	No

**Power Requirements:**

kVA	1.2
Plates	1
Plug	Russellstoll, FS3720, L6-20P**
Receptacle	Russellstoll, FS3743, L6-20R**
Connector	Russellstoll, FS3913
Power Cord Style	A2

**Environment, Operating:**

Temperature	16°C-32°C (60°F-90°F)
Rel Humidity	20%-80%
Max Wet Bulb	26°C (78°F)
<b>Environment, Nonoperating:</b>	
Temperature	10°C-43°C (50°F-110°F)
Rel Humidity	8%-80%
Max Wet Bulb	27°C (80°F)

**Notes:**

- \*The Model B1 can be attached to either side of the Model A1, with a maximum of three devices on a side. All devices are physically attached at the front corner, allowing up to 90° swing between devices.
- \*\*Type 1173 installations only.

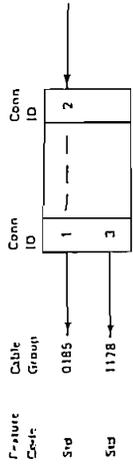


Figure 3430

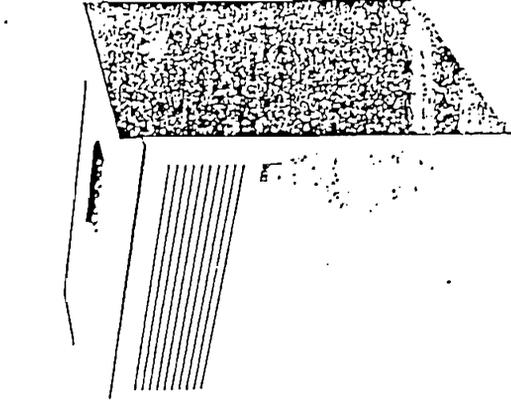
Feature Code	Group No.	No. of Cables	Conn ID	Max Length		Model	Notes
				m	ft/in		
C-1	0185	2	1	122 (4'00)	A1	1	2
	1178	1	3	122 (4'00)	A1	1	

Figure 3430

Feature Code	Conn ID	Model	Notes
C-1	2	A1	1

**Notes:**

- 1 Maximum cable length must be reduced by 4.5 meters (15 feet) for each device connected between a 3430 and the attached channel.
- 2 Power sequence and control cable is optional.



3480 CONTROL UNIT MODELS A11 AND A22

SPECIFICATIONS

Dimensions:

mm	(inches)	Front	Side	Height
660	(26)	660	750	1 000
			(29-3/4)	(39-1/2)

Service Clearances:

mm	(inches)	Front	Rear	Right	Left
915	(36)	915	0	610	610
		(36)	(36)	(0)	(24)

Weight: 195 kg (430 lb)

Heat Output: 1 kW (3,400 BTU/hr)

Airflow: 1.2 m<sup>3</sup>/min (400 cfm)

Power Requirements:

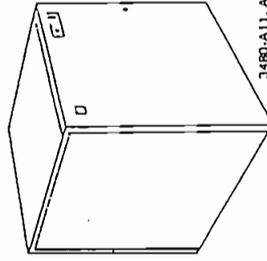
kVA	1
Phases	3
Plug	R&S, J760
Receptacle	R&S, J754
Connector Housing	R&S, J9J4
Power Cord Style	D4

Environment, Operating:

Temperature	15°C-32°C (60°F-90°F)
Rel Humidity	20%-80%
Max Wet Bulb	25.6°C (78°F)

Environment, Nonoperating:

Temperature	10°C-43°C (50°F-110°F)
Rel Humidity	8%-80%
Max Wet Bulb	26.7°C (80°F)



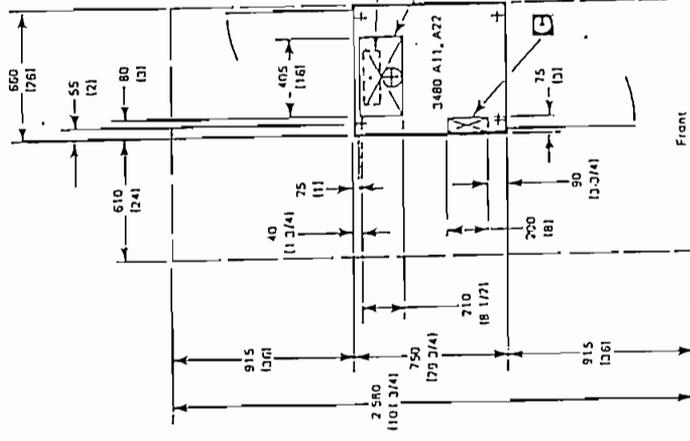
3480-A11, A22  
(Front View)

Machine Specifications and Cabling Schematics 3480.2

3480 CONTROL UNIT MODELS A11 AND A22

PLAN VIEW (Metric Scale: 10 mm = 0.25 in)

English measurements are shown in parentheses.



Note: The 3480 Control Unit with the dual-control unit communi-  
cations complex feature are interconnected with its adjacent cables.  
11-pin level length cabling has an entry/exit point at either B  
(top) level (down) or C (rear) level (down). Entry-level  
features may use either the side cable entry/exit floor cutout C  
or the rear cable entry/exit floor cutout A (6" x 17").

Mount level features must use the rear cable entry/exit floor  
cutout A. Cable length measurements must be made between  
these cable entry/exit locations on the two control units.

See the table on page 3480.5 for the serial number range of the  
power level (down).

SPECIFICATIONS

Dimensions:

mm	(inches)	Front	Side	Height
510	(20)	510	750	1 000*
			(29-3/4)	(39-1/2)*

Service Clearances:

mm	(inches)	Front	Rear	Right	Left
915**	(36)**	915	0	610***	0
		(36)**	(36)	(24)***	(0)

Weight: 155 kg (340 lb)

Heat Output: 800 W (2,700 BTU/hr)

Airflow: 1.2 m<sup>3</sup>/min (400 cfm)

Acoustical Data:

For definitions, see "Acoustics" in Chapter 3 of *IBM  
General Information Manual: Installation Manual  
Physical Planning, GC22-7072*.

Operating (both)	Operating (top)	Operating (bottom)	L <sub>WAJ</sub> < 1 μA > m	
			No	Yes
7.3	1.4	55.0	56.0	56.0

Power Requirements: †

kVA	0.9
Phases	3

Environment, Operating:

Temperature	15.0°C-32.0°C (60°F-90°F)†
Rel Humidity	20% - 80%
Max Wet Bulb	25.6°C (78°F)†

Environment, Nonoperating:

Temperature	10°C-43°C (50°F-110°F)†
Rel Humidity	8%-80%
Max Wet Bulb	26.7°C (80°F)†

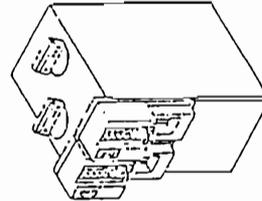
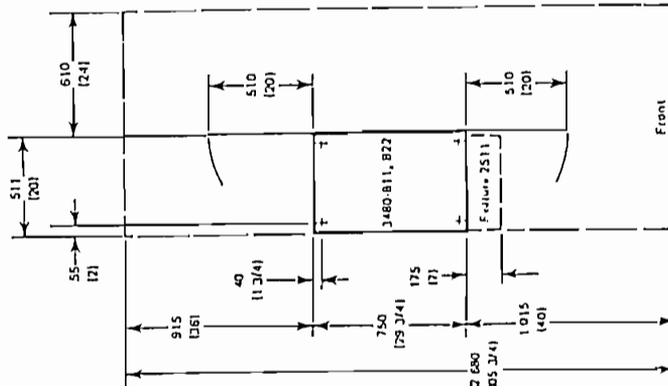
Note:

- \*The operator's control panel extends an additional 80 mm (3-1/4 inches) above the top cover.
- \*\*Feature 2511 requires an additional 100 mm (4 inches) of service clearance at the front of the 3480-B11 and -B22.
- \*\*\*The right service clearance applies to only the rightmost tape unit attached to a control unit.†Power is received from the 3480 Control Unit.

80 TAPE UNIT MODELS B11 AND B22

PLAN VIEW (Metric Scale: 10 mm = 0.25 in)

English measurements are shown in parentheses.



3480-B11, B22 with  
Feature 2511 Installed  
Front View

SPECIFICATIONS

**Environment, Operating:**  
 Temperature 16°C-36°C (60°F-100°F)  
 Rel Humidity 8%-80%  
 Max Wet Bulb 21°C (70°F)

**Environment, Nonoperating:**  
 Temperature 10°C-43°C (50°F-110°F)  
 Rel Humidity 8%-80%  
 Max Wet Bulb 27°C (80°F)

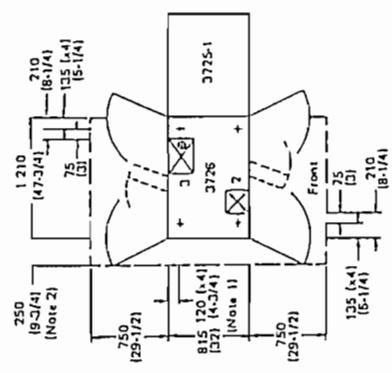
**Notes:**  
 • United States and Canada:  
 World Trade America Group and World Trade Asia/Pacific Group:  
 60 Hz: 200 V, 230 V, 200 V, or 240 V  
 60 Hz: 200 V, 208 V, 220 V, or 240 V  
 World Trade Europe/Middle East/Africa Corporation:  
 50 Hz: 230 V, 230 V, or 240 V  
 60 Hz: 230 V  
 \*\* In Chicago, Illinois, USA, specify code 9986 for a 1.8-m (6-ft) cord.

Dimensions:	Front	Side	Height	Right	Left
mm	1,210	315	1,625	0	250
mm (in.)	(47.3)	(12.4)	(64)	(0)	(9.8)
<b>Cable Parameters:</b>					
mm	250	75			
mm (in.)	(9.8)	(3.0)			
<b>Weight:</b>					
kg (lb)	5.0				
kg (lb)	2.9				
kg (lb)	15.5				
<b>Power:</b>					
VA	23				
W	1				
VA	200, 208, 220, 240				
W	230, 240				
<b>Frequency:</b>					
Hz	50 (1.0), 60 (1.0)				
<b>Dimensions:</b>					
mm	1,210				
mm (in.)	(47.3)				
<b>Power Requirements:</b>					
VA	23				
W	1				
VA	200, 208, 220, 240				
W	230, 240				
<b>Frequency:</b>					
Hz	50 (1.0), 60 (1.0)				
<b>Dimensions:</b>					
mm	1,210				
mm (in.)	(47.3)				

Note: Although the maximum current consumption does not exceed 15 A, the power receptacle at the customer premises should be able to handle inrush current up to 20 A (in support quick on and off switching of the 3726 Model 13726).

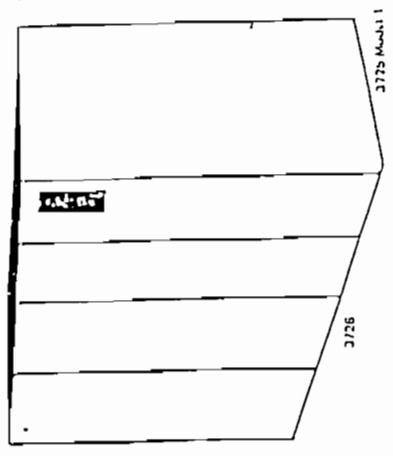
Machine Specifications and Cabling Schematics 3725/3726.4

3726 COMMUNICATION CONTROLLER EXPANSION  
 PLAN VIEW (Metric Scale: 10 mm = 0.5 in)  
 English measurements are shown in parentheses.



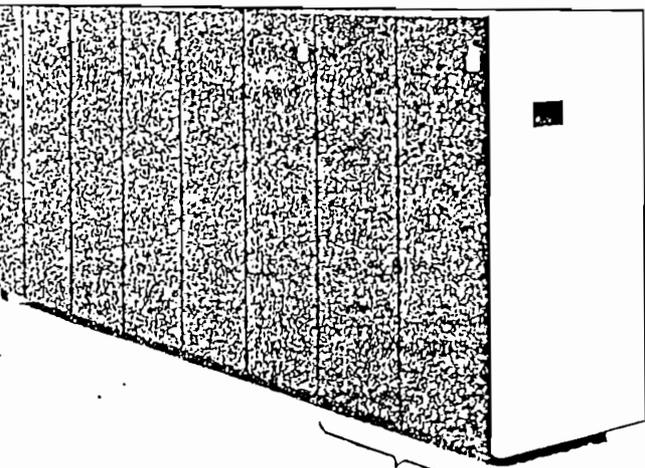
- Notes:**
- If required, the width can be reduced to 750 mm (29.1/2 inch).
  - The service clearances can be reduced to 0 when another machine is abutted to the left side of the 3726, if the cabinet can be opened as shown on the plan view.
  - Caster and cable hole locating dimensions are measured from edge of frame, not cover.
  - Ground plates are delivered with the 3726. These plates are installed by the service representative during machine installation. Cutways in the plates correspond to the existing cable holes shown in the plan view.

Cable Entry/Exit Number	Dimensions (Millimeters)	Dimensions (Inches)
2	250 x 250	9.84 x 9.84
3	360 x 250	14.174 x 9.84

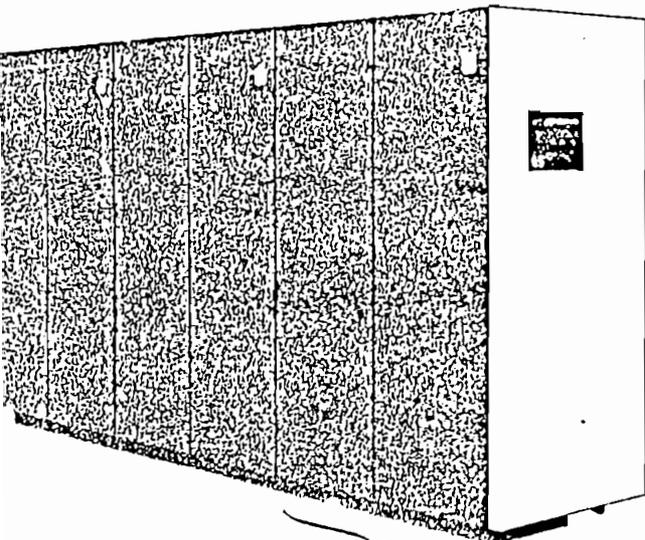


3380 DIRECT ACCESS STORAGE MODELS  
A04, AA4, AD4, AND AE4

SPECIFICATIONS



3380 A04, AA4



3380 AD4, AE4

Dimensions:

	Front	Side	Height
mm	1 015*	815	1 790
(inches)	(40*)	(32)	(70-1/2)

Service Clearances:

	Front	Rear	Right	Left
mm	815	815	865	0
(inches)	(32)	(32)	(34)	(0)

Weight: 545 kg (1,200 lb)

Heat Output and Power Requirements:\*\*

Voltage	Max kVA	Max kW	Max (kBTU/hr)
200/208	2.50	1.78	(6.10)
220/380	2.90	1.87	(6.40)
230/400	3.10	1.85	(6.35)
240/415	3.30	1.88	(6.45)
Phases	3		
Plug	Russellatoll, 7328		
Receptacle	Russellatoll, 7324		
Connector	Russellatoll, 7428		
Power Cord Style	E1		

Airflow: 8.5 m<sup>3</sup>/min (300 cfm)

Acoustical Data:

For definitions, see "Acoustics" in Chapter 3 of *IBM General Information Manual: Installation Manual—Physical Planning*, GC22-7072.

L <sub>WAd</sub>		<L <sub>pA</sub> > m		I	T
Operating (bels)	Idling (bels)	Operating (dB)	Idling (dB)		
7.9	7.9	58.0	58.0	No	No

Environment, Operating:\*\*\*

Temperature	16°C-32°C (60°F-90°F)
Rel Humidity	20%-80%
Max Wet Bulb	26°C (78°F)

Environment, Nonoperating:

Temperature	10°C-43°C (50°F-110°F)
Rel Humidity	8%-80%
Max Wet Bulb	27°C (80°F)

Environment, Storage: (Maximum 1 year)

Temperature	1°C-60°C (34°F-140°F)
Rel Humidity	5%-80%
Wet Bulb Range	1°C-29°C (34°F-85°F)

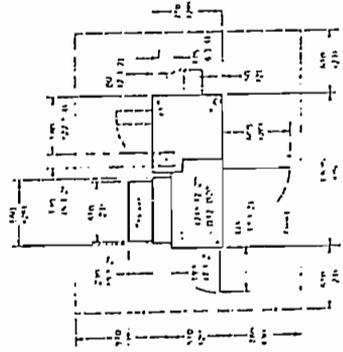
Notes:

- \* Add 57 mm (2-1/4 in.) to the front dimension for each end cover that is attached to this machine.
- \*\* Values vary with input voltage, installed features, and manufacturing variations.
- \*\*\* Biocides containing organometallic oxide *must not* be used in the air-conditioning systems of buildings containing these machines.

4245 PRINTED MODELS 12 AND 20 (CHANNEL ATTACHED) AND MODELS D12 AND D20 (COAXIAL CABLE ATTACHED, CHANNEL PROTOCOL)

PLAN VIEW (Metric Scale: 10 mm = 0.5 in.)

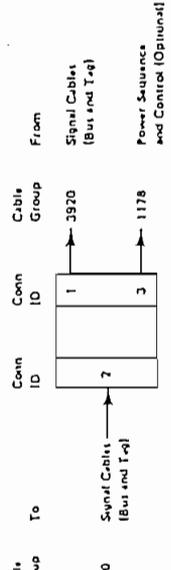
English measurements are shown in parentheses.



15 PRINTER MODEL 1 POWER CORD SPECIFICATIONS

Length	Cable Nominal OD	Number of Shields	Conductors		AWG No
			Number	Nominal OD	
1160 Hz: 4.27 m (14 ft) Chicago, Illinois, U.S.A. - 1.83 m (6 ft)	15.4 mm (0.604 in.)	0	4	1.63 mm (0.064 in.)	14
2512 Europe (220v)	11 mm (0.43 in.)	0	5	1.28 mm (0.051 in.)	-

15 PRINTER MODEL 1 CABLING SCHEMATIC



15 PRINTER MODEL 1

Group No	Qty of Cables	Cable ID	Max Length m	Comment	Wires
1178	1	1	122 (400)	Bus and sig	1
1178	1	3	46 (150)	Power sequence and control	2

15 PRINTER MODEL 1

Cable ID	Comment
1	Bus and sig

Maximum cable length is 122 meters (400 feet), unless modified by system or channel limitation. Maximum cable length must be reduced by 5 meters (15 feet) for each unit connected between the 4245 and the channel. Cable group 1178, power sequence and control cable, is optional.

SPECIFICATIONS

Dimensions:

Front	Side w/h stacker	Side with stacker	Height
1525 (60)	710 (28)	950 (37-1/2)	1170 (46-1/4)

Service Clearances:

Front	Rear	Right	Left
760 (30)	970 (38)	610 (24)	610 (24)

Weight: 410 kg (910 lb)

Treat (Output (approx)):

Model 12	Model 20
2 (800) (6.450)	2 (500) (4.500)

Airflow: 17 m<sup>3</sup>/min (600 cfm)

Acoustical Data:  
In accordance with "Annexes" in Chapter 3 of IEC General Information Manual: Installation Manual - Physical Planning, IEC-2002.

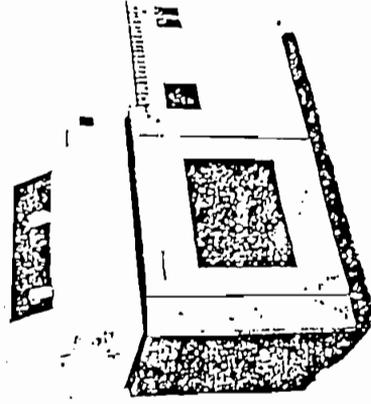
Operating (fch)	Idle (fch)	L <sub>eqA</sub> > m	
		<L <sub>eqA</sub>	> m
7.9	6.6	63.0	50.0
7.8	6.9	63.0	52.5
7.5	6.5	63.5	50.0
7.9	6.8	67.0	57.5

Power Requirements:

Volts	50 Hz	60 Hz
200, 220, 240, 250, 260, 270, 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, 350, 360, 380, 400, 415, 440, 460, 480, 500, 520, 550, 575, 600, 630, 660, 690, 720, 750, 780, 800, 850, 900, 950, 1000		
KVA	Model 12	Model 20
Pluses	3	3
Inrush Current	150 A maximum	
Power Factor	0.9	
Plug	R&S 3760	
Connector	R&S 2734	
Receptacle	R&S 2734	
Power Cord Style	Use following page	

Environment - Operating:

Temperature	16°C to 32°C (60°F to 90°F)
Rel Humidity	8% to 80%
Max Wet Bulb	23°C (73°F)



**SPECIFICATIONS**

**Dimensions:**

Front	Side	Height
Single Frame:		
mm	1130	1790
inch(es)	(44.125)	(70.125)

**Dual Frame:**

mm	2145	1790
inch(es)	(84.412)	(70.125)

**Service Clearances:**

Front	Rear	Right	Left
mm	740	865	0
inch(es)	(29.1)	(34)	(0)

**Dual Frame:** See the dual frame plan view on page 3880.1.

**Weight:**

Model 13	Model 21	Model 11 and 23
lb	125	545
kg	(56.7)	(247)

**Heat Output:**

W	Model 13	Model 21	Model 11 and 23
BTU/hr	1400	750	2,300**
W	(400)	(219)	(673)

**Airflow:**

cfm	Model 13	Model 21	Model 11 and 23
cfm	9.0	9.0	15.0
m <sup>3</sup> /min	(0.25)	(0.25)	(0.42)

**Vertical Data:**

1 - Dimensions, or "Accessories" in Chapter 3 of the General Information Manual. Installation Manual Physical Planning, 02-23032.

1 in. x 1 ft	< 1 in. x 1 ft	
	Idle (dB)	Operating (dB)
13	7.7	33.0
21	4.0	56.0

**Power Requirements:**

kVA	1.7	0.9	7.5*	2.8**
Phases	3	3	3	3
Disk	R4S, 3730	R4S, 3730	R4S, 3730	R4S, 3730
Receptacle	R4S, 3744	R4S, 3744	R4S, 3744	R4S, 3744
Connector	R4S, 3914	R4S, 3914	R4S, 3914	R4S, 3914
Power Cord Style	B1	B1	B1	B1

A phase imbalance will exist depending on cache size, channel configuration, and power configuration.

**Typical Configurations and Measurements**

Power Configuration	Amperes In Phase			Channel Configuration	Cache Size (M-bytes)
	A	B	C		
60-Hz Delta	8.65	9.67	7.54	8	16
50-Hz Delta	5.92	8.00	7.29	4	32
50-Hz Wye	4.33	2.90	4.71	4	16

**Environment, Operating:**

Temperature	16°C (61°F) to 30°C (86°F)
Rel Humidity	20% to 40%
Max Wet Bulb	26°C (78°F)

**Environment, Nonoperating:**

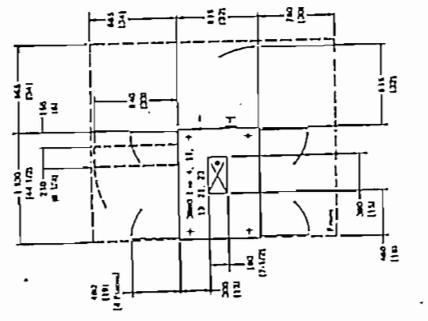
Temperature	10°C (50°F) to 60°C (140°F)
Rel Humidity	5% to 95%
Max Wet Bulb	27°C (80°F)

**Notes:**

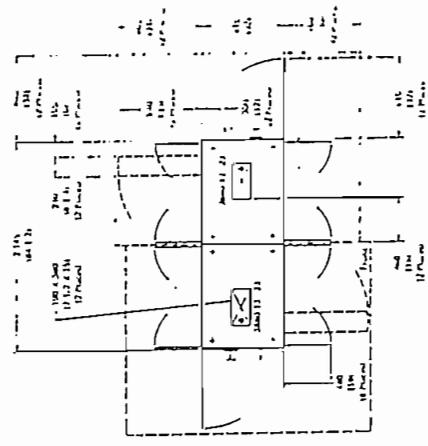
- \* On the Model 13 with the eight-channel switch feature, heat output is 2,360 W (8,200 BTU/hr) and 15.4 m<sup>3</sup>/min.
- \*\* On the Model 23 with the eight-channel switch feature, heat output is 2,830 W (9,700 BTU/hr) and 15.4 m<sup>3</sup>/min.

**3880 STORAGE CONTROL MODELS 1-4, 11, 13, 21, AND 23**  
**PLAN VIEW (Metric Scale: 10 mm = 0.5 in.)**  
 English measurements are shown in parentheses.

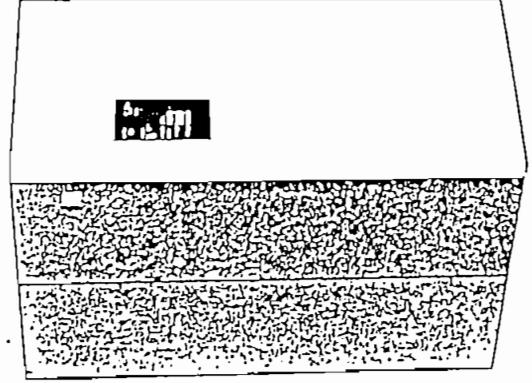
**Single-Frame Configuration**



**Dual-Frame Configuration (Model 13 or 23)**



1 in. x 1 ft	< 1 in. x 1 ft	
	Idle (dB)	Operating (dB)
13	7.7	33.0
21	4.0	56.0



3880 ID-ramp Model

\* Two Model 13s or 23s may be bolted together in a dual frame configuration. The cover on the zero-clearance end of each frame is removed before the frames are bolted together.

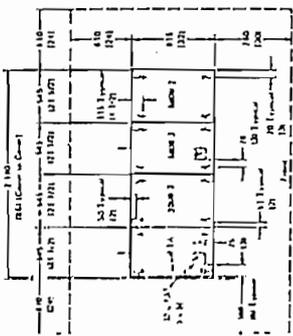
**CAUTION**

If a dual-frame 3880 Model 23 is to be installed on a nonraised floor or on a raised floor that has no metallic shielding, RETAIN, search argument J660 718 781.

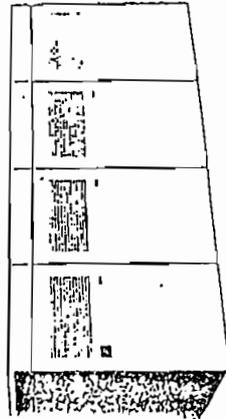
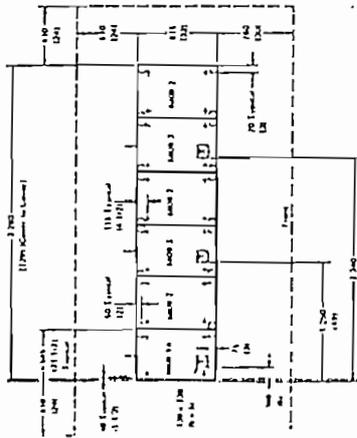
8809 MAGNETIC TAPE UNIT MODELS 1A, 2, AND 3

LINEARY Metric Scale: 10 mm = 0.5 m)

English measurements are shown in parentheses.



Maximum Configuration



SPECIFICATIONS

Dimensions:

mm	Front	Side	Height
(inches)	545 (21-1/2)	815 (32)	1000 (39-1/2)

Service Clearances:

mm	Front	Rear	Right*	Left**
(inches)	760 (30)	610 (24)	610 (24)	610 (24)

Weight:	Model
kg	1A 2 3
(lb)	137 98 129 (302) (215) (285)

Heat Output:	Model
W	1A 2 3
(BTU/hr)	425 380 425 (1 450) (1 300) (1 450)

Airflow:	Model
m <sup>3</sup> /min	1A 2 3
(cfm)	2.8 2.8 2.8 (100) (100) (100)

Power Requirements:	Model
kVA	1A 2** 3
	0.66 0.5 0.66

Phases	Model
	1 1 1

Plug	Model
	NEMA 5-15P or NEMA 6-15P

Receptacle/Connector	Model
	NEMA 5-15R or NEMA 6-15R

Power Cord Style	Model
	A1

For machines with waterproof plug, specify feature SF5002.

Plug:	250 V
	R&S 3720U-1 R&S 3730U-2

Connector:	Model
	R&S 3743U-1 R&S 3743U-2

Receptacle:	Model
	R&S 3913U-1 R&S 3913U-2

Environment, Operating:

Temperature	Model
	16°C (38°C) (50°F-100°F)

Rel Humidity	Model
	8% to 80%

Max Wet Bulb	Model
	26°C (78°F)

Environment, Nonoperating:

Temperature	Model
	10°C-43°C (50°F-110°F)

Rel Humidity	Model
	8% to 80%

Max Wet Bulb	Model
	27°C (80°F)

Notes:

- \* Required clearance when the tape unit is at the end of the rack series.
- \*\* Model 2 receives power from a Model 1A or 3.

Machine Specifications and Cabling Schematics

# 4341 PROCESSORS SPECIFICATIONS

## Dimensions\* (Basic Processor):

	Front	Side	Height
Dimensions	815 (32)	2 390 (94-1/4)	1 000 (39-1/2)

## Dimensions\* (with Channel-to-Channel Feature):

	Front	Side	Height
Dimensions	815 (32)	3 190 (125-3/4)	1 000 (39-1/2)

## Clearances (Basic Processor):

	Front	Rear	Right	Left
Clearances	1 100 (43-1/4)	1 100 (43-3/4)	1 105 (43-1/2)	1 580 (62-1/4)

## Weight:

Group	Weight
Groups 1, 10, and 11	2
Model 01	545 kg (1,200 lb)
Model 02	270 kg ( 590 lb)
Model 03	185 kg ( 400 lb)
Model 1	1 000 kg (2,190 lb)

## Output: (maximum)

Group	Output
Groups 1, 10, and 11	2
Model 01	4 050 W (13,800 BTU/hr)
Model 02	4 800 W (16,400 BTU/hr)
Model 03	5 150 W (17,600 BTU/hr)

## Airflow: (downdraft)

Group	Airflow
Groups 1, 10, and 11	2
Model 01	37 m <sup>3</sup> /min (1,300 cfm)
Model 02 or 03	44 m <sup>3</sup> /min (1,550 cfm)

## Power Requirements:

Group	Power
Groups 1, 10, and 11	2
Model 01	5.6
Model 02 or 03	6.0
Model 1	4.4
Model 01	4.8
Model 02 or 03	3

## Voltages

	Nominal	Minimum	Maximum
50 Hz	200	180	220
	220	193	238
	380	333	410
	400	350	432
60 Hz	415	363	448
	200	180	220
	208	180	220
	220	193	238
	240	208	254

Power monitoring circuits require that power lines be contained in properly grounded conduit or shielded cables.

## Power Cord:

Length (meters)	4.3 (optionally, 1.8)
Length (feet)	(14) (optionally, 6)

## U.S.A. and Canada:

Plug	R&S, 3760 (Provided by IBM)
Receptacle	R&S, 3754 (Provided by Customer)
Connector	R&S, 3934 (Provided by Customer)

## World Trade Countries (Except Canada):

The machine is shipped without plug on the power cord. This plug is customer-provided according to local codes and national requirements.

Power Cord Style: D1 (See Appendix B.)

## Operating Environment:

Temperature:	10-32°C (50-90°F)
Rel Humidity:	8-80%
Max Wet Bulb:	23°C (73°F)

## Nonoperating Environment:

Temperature:	10-43°C (50-110°F)
Rel Humidity:	8-80%
Max Wet Bulb:	27°C (80°F)

## Minimum dimensions with covers removed:

	Front	Side	Height
Model 01	750 (29-1/2)	1 525 (60)	975 (38-1/2)
Model 02 or 03	750 (29-1/2)	760 (30)	975 (38-1/2)