

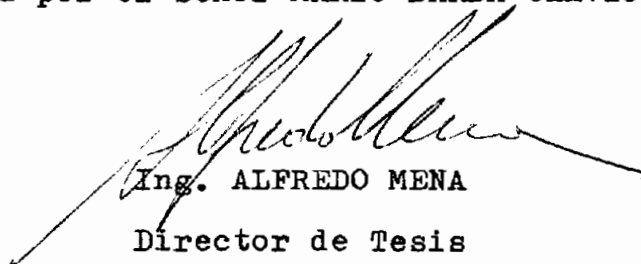
DISEÑO DE UN GENERADOR ELECTROSTATICO
DE VAN DER GRAAFF PARA PRUEBA DE
EQUIPOS CON CORRIENTE CONTINUA

Tesis previa a la obtención del Título de
Ingeniero Eléctrico
de la Escuela Politécnica Nacional

MARIO BARBA CLAVIJO

Quito, Noviembre de 1.975

Certifico que el presente trabajo de
Tesis ha sido realizado en su totali
dad por el señor MARIO BARBA CLAVIJO



Ing. ALFREDO MENA
Director de Tesis

P R O L O G O

Nuestro país esta atravesando por una etapa de desarrollo en la que se ha dado primordial importancia a la industrialización y en este campo ha tenido un auge preponderante la industria eléctrica que tiene en mente la realización de grandes proyectos.

La Escuela Politécnica Nacional está en el deber de garantizar los adelantos que se logren, siendo también importante los logros que se puedan conseguir dentro del campo de la investigación, el cual debe ir a la par con el desarrollo del país.

La construcción del equipo cuyo diseño se presenta en este trabajo, puede constituirse en un elemento importante en el campo de pruebas y normalización, así como también es una fuente de investigación y experimentación, base del conocimiento científico.

El generador de Van der Graaff, es conocido desde hace mucho tiempo y es utilizado en grandes centros de investigación en especial en el campo de la Física Nuclear, al escoger como Tesis de Grado, el diseño de un similar, no me lleva sino el deseo de despertar en la conciencia de nuestro pueblo, la in-

quietud de considerar la capacidad industrial del país.

El presente estudio es un resumen de los conocimientos adquiridos en la institución y de la poca información que sobre este tópico existe, precisamente la que podría ser ampliada por experimentación sobre el modelo.

Quiero expresar mi agradecimiento a todos mis profesores que de una u otra forma han sabido inculcarme conocimientos que me serán valiosos en mi vida profesional. Un agradecimiento especial a los compañeros del Departamento de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la E.P.N., que me han brindado su apoyo, en especial al Ing. Alfredo Mena, por su desinteresada guía y acertadas sugerencias, así como también a todas las personas que han colaborado conmigo, para el buen logro de este trabajo.

MARIO BARBA CLAVIJO

Quito, Noviembre 21 de 1.975

I N D I C E

Prólogo	iv
CAPITULO I GENERACION DE ALTAS TENSIONES CONTINUAS	
1.1.- Alta Tensión continua rectificada..	1
1.1.1.- Rectificación de un solo escalón.	2
1.1.2.- Instalaciones multiplicadoras del voltage en varios escalones.....	4
1.2.- Generadores electrostáticos.....	7
1.2.1.- Fenómenos electrostáticos.....	7
1.2.2.- El Electrógrafo.....	11
1.2.3.- El generador de Wimshurst.....	12
1.2.4.- Generador electrostático de Van der Graaff.....	14
CAPITULO II TEORIA DEL CAMPO ELECTRICO	
2.1.- Forma de los electrodos.....	19
2.2.- Problema electrostático.....	20
2.2.1.- Método de las imagenes.....	21

2.2.2.- Potencial de una carga exterior a una esfera.....	25
2.2.3.- Potencial producido por una esfera cargada.....	26
2.3.- Aislamiento.....	28
2.3.1.- Teoría de la descarga en los gases.	30
2.3.2.- Descarga en campos homogéneos.....	33
2.3.3.- Descarga en campos fuertemente no- homogéneos.....	34
2.3.4.- La perforación del aire según Schwaiger.....	36
2.3.5.- Coeficiente de seguridad.....	40

CAPITULO III DISEÑO DE LOS ELEMENTOS ESTATICOS DEL
GENERADOR DE VAN DER GRAAFF

3.1.- Análisis sobre un arreglo ideal.....	42
3.1.1.- Análisis para $k_s = 2.135$	44
3.1.2.- Análisis para $k_s = 1.42$	46
3.2.- Electrodo receptor real	47
3.2.1.- Análisis para $k_s = 2.135$	49
3.2.2.- Análisis para $k_s = 1.42$	50
3.3.- Electrodo de tierra	51
3.4.- Dimensionamiento.....	52
3.5.- Comprobación y reajuste.....	55
3.6.- Cálculo de parámetros	58
3.6.1.- Material y peso del electrodo re- ceptor.....	58
3.6.2.- Capacidad y carga	59

CAPITULO IV DISEÑO DE ELEMENTOS DINAMICOS Y COMPLE-
MENTARIOS - MONTAJE Y PRESUPUESTO

4.1.- Banda transportadora de carga.....	62
4.1.1.- Materiales.....	63
4.1.2.- Experimentación	64
4.1.3.- Funcionamiento mecánico.....	67
4.1.4.- Funcionamiento eléctrico.....	69
4.2.- Poleas, ejes y rodamientos.....	70
4.2.1.- Poleas	70
4.2.2.- Ejes.....	72
4.3.- Soportes aislantes.....	74
4.4.- Ecualizadores de campo	77
4.5.- Alimentación y transferencia de carga	78
4.6.- Especificaciones del motor.....	80
4.7.- Montaje.....	82
4.8.- Materiales y presupuesto.....	83
4.9.- Conclusiones.....	84

C A P I T U L O I

GENERACION DE ALTAS TENSIONES CONTINUAS

Las corrientes continuas de Alta Tensión se consiguen mediante la rectificación de Alta Tensión Alternada o mediante generadores electrostáticos.

En general las corrientes de Alta Tensión continua se emplean en redes de tracción eléctrica (1500 a 4000 v.), instalaciones de rayos Roentgen (50, 80 Kv y algunas veces hasta 200...600 Kv), en las emisoras de radio, telegráficas y telefónicas (hasta 50 Kv), en los filtros eléctricos (30...80 Kv), para la desintegración del átomo (unos 1000 Kv), alimentación en los laboratorios de generadores de choque (de 30 a 100 Kv), para prueba de cables , aisladores y condensadores (hasta 1000 Kv), así como también para el transporte de energía eléctrica. (L1)

1.1.- Alta Tensión continua rectificada

La conversión de corriente alterna en continua, se efectúa en ocasiones , cuando se trata de redes de tracción, mediante conmutatrices y grupos convertidores, pero más frecuentemente con rectificadores de vapor de mercurio; en instalaciones de rayos Roentgen se usan tubos de cátodo incandescente; rectificadores mecánicos o rectificadores de Selenio en instalaciones de ensayo y generadores de choque.

1.1.1.- Rectificación de un solo escalón

Es la conexión más simple, mediante la cual el aparato de consumo se conecta a los bornes del transformador, a través de una válvula rectificadora, y constituye lo que se denomina un rectificador de media onda, que frecuentemente utiliza un condensador de aplanamiento, con lo que se consigue que la onda no sea pulsante.

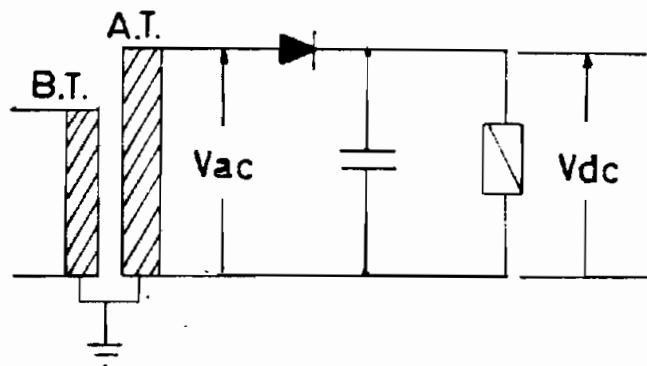


Fig. 1.1.- Rectificación de media onda

Con esta conexión la válvula bloquea el paso de corriente en uno de los dos sentidos y entre tanto dicha válvula soporta prácticamente la plena tensión del transformador.

El curso del voltaje y la corriente depende de las características del rectificador, condensador, de la carga y del mismo transformador.

La conexión para rectificación de onda completa, viene a consistir en una duplicación del montaje de media onda. Según se desprende del diagrama, el arrollamiento secundario debe suministrar un voltaje doble del que corresponde a la tensión continua, lo cual constituye una desventaja.

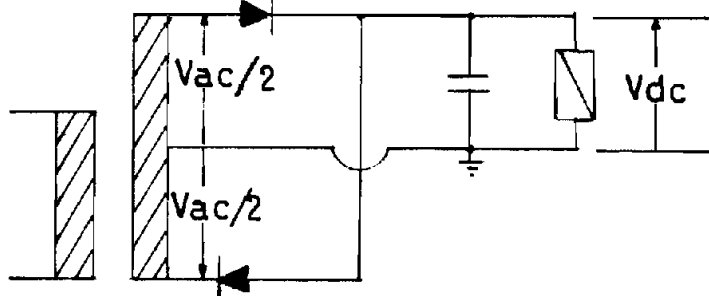


Fig. 1.2.- Rectificación de onda completa con punto medio en el transformador.

Un segundo montaje que se halla exento del inconveniente citado, lo constituye el llamado sistema monofásico en puente o de Graetz con cuatro válvulas.

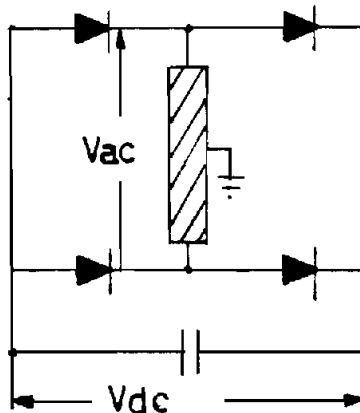


Fig. 1.3.- Conexión de Graetz

La tensión continua que se obtiene es dos veces la tensión de cresta del transformador. Estos son los montajes más importantes de rectificación, los cuales se han descrito rápidamente, y proporcionan tensiones de una o a lo más dos veces la tensión de cresta del transformador. Para voltajes superiores, se recurre a las conexiones multiplicadoras de tensión, siempre que la potencia de salida sea pequeña. (L1)

1.1.2.- Instalaciones multiplicadoras del voltaje en varios escalones (Conexión en cascada)

La cascada de Greinacher o generador de Cockcroff-Walton , es uno de los circuitos de generación de Alta Tensión continua que más se utiliza, puesto que de una concepción básica relativamente simple, se pueden añadir etapas hasta lograr voltajes más elevados. Una de las ventajas es sobre las sollicitaciones a que están sometidas cada uno de los elementos y que es poco más o menos, unicamente al que corresponde a la tensión individual del mismo.

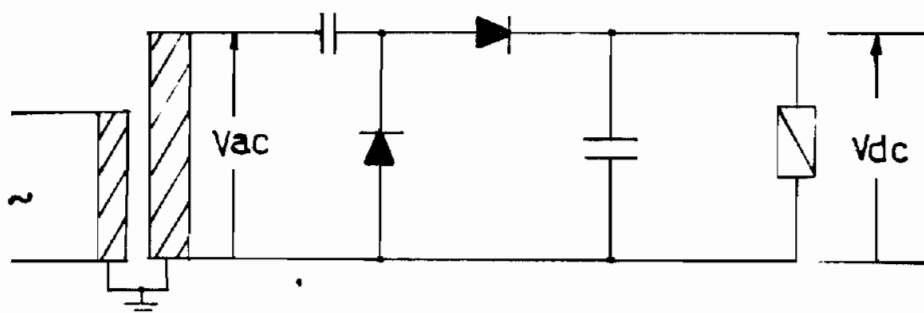


Fig. 1.4.- Circuito doblador según Greinacher

La cascada de Cockcroff-Walton, añade etapas a este circuito básico y cuya secuencia de carga es la siguiente:

El condensador C1 (Fig. 1.5), mediante el rectificador 1 es cargado a un voltaje V, el potencial en el punto A, con relación a tierra es igual a la suma $V + V \sin \omega t$ y podría considerarse como la fuente de voltaje que carga al capacitor C2, a través del rectificador 2 a un voltaje 2V. La máxima diferencia de potencial entre los puntos A1 y A2 es 2V, el capacitor C3 se carga a este voltaje con lo que el punto A3

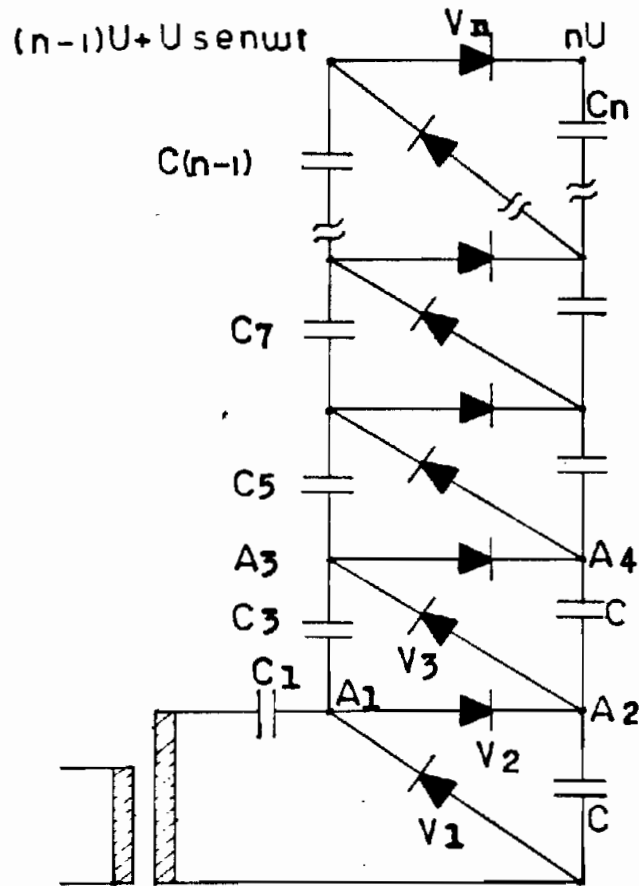


Fig. 1.5.- Principio del generador de Cockcroft-Walton.

tiene un voltaje igual a $3V + V \sin \omega t$, y así sucesivamente.

En un generador ideal sin carga, el voltaje en un capacitor impar es siempre $kV + V \sin \omega t$ y en capacitor par por kV .

Si se tiene que el número de etapas es igual al número de capacitores, encontramos que el voltaje del transformador ha sido multiplicado por el doble de estas etapas.

Si el generador se carga de manera que circule una corriente i , aparece una caída de voltaje, acompañada con el efecto rizado. Esta caída y rizado del voltaje es muy pequeño cuando la capacitancia del primer condensador es doble

de los otros. En este caso, Bouwers y Kuntke, han derivado una relación para el voltaje de un generador de n etapas trabajando a una frecuencia f, con condensadores de capacidad C y una carga i :

$$\Delta V_c = \frac{i}{f \cdot C} \left(2 \frac{n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right) \quad 1.1$$

y para el rizado sobre el voltaje D.C.

$$\delta V_c = \frac{i}{f \cdot C} \left(\frac{n^2}{2} + \frac{n}{2} \right) \quad 1.2$$

Es interesante notar que para cierto valor de n , la expresión del voltaje $V_c = 2nV - \Delta V_c$, muestra un máximo, lo que indica que el generador no es apto para producir un voltaje arbitrario. El número de etapas es limitado. Han sido construidos generadores de este tipo para voltajes de 2 a 2.5 millones de voltios.

Los condensadores deberían soportar en operación el voltaje 2V, el doble del voltaje de pico secundario del transformador de Alto Voltaje. La capacitancia de estos condensadores como regla es de unos diez mil pico-faradios para generadores que operan con una frecuencia de algunos cientos de herzios. En serie con los condensadores se conecta una resistencia de amortiguamiento que limita la corriente en el caso de corto-circuitos.

Otro elemento importante de la cascada es el rectifica-

dor, existen de mercurio y al vacío, lograndose que el voltaje de pico inverso sea el doble del voltaje del transformador. Aparte de las válvulas de mercurio o al vacío, se han desarrollado los rectificadores de Selenio, diseñados para muy altos voltajes, sin filamento de calentamiento que han simplificado considerablemente el diseño del generador. (12)

1.2.- Generadores electrostáticos

Para cierto tipo de aplicaciones en que se requieren muy elevados voltajes , con rizado practicamente nulo y en que las corrientes de salida son de menor importancia, se utilizan generadores electrostáticos. Su origen es en realidad muy antiguo, si se consideran los primeros experimentos de Otto von Guericke (hace más de 300 años) relativos a la electricidad por frotamiento y los de Hóltz y Wilmshst con su máquina de influencia en 1.870. (13)

1.2.1.- Fenómenos electrostáticos

Los antiguos griegos conocían el hecho de que cuando el ámbar (resina amarillenta), se frota, adquiere la propiedad de atraer hacia ella pequeños trozos de materia. Es decir se ponen de manifiesto fuerzas entre estas partículas y el ámbar suficientes para contrarrestar las fuerzas de la gravedad. Cuando ámbar o cualquier otra sustancia adquiere esta propiedad se dice que está electrizada. La electrización por el proceso de frotamiento se conoce como "triboe-

lectrificación, William Gilbert, en el siglo XVI, investigó este tipo de electrización y basándose en sus observaciones, dividía a las sustancias en dos clases: aquellas que se electrizaban las llamó eléctricas y aquellas que fué incapáz de electrizar las denominó no-eléctricas (metales).

Estos dos grupos son conocidos ahora como aisladores y conductores.

Un siglo más tarde Du Fay demostró que la distinción entre estos dos grupos, no depende de la posibilidad de ser electrizados, sino de su capacidad para retener la electrización en el punto donde se produce. La condición de electrización es perdida por un conductor si éste se conecta a través de un camino conductor a algún otro más grande como la tierra. Du Fay encuentra también que es necesario suponer dos tipos de electrización, para explicar los fenómenos por él observados. Estos dos tipos los llamó "vítreos" y "resinosos" a causa de que el primero era asociado a materiales que se comportaban como el vidrio y el segundo a sustancias análogas a la resina.

Años más tarde, Benjamín Franklin, sugiere que en realidad había únicamente un tipo de electricidad, que estaba presente en una cierta cantidad normal en todos los cuerpos descargados o neutros. Un exceso sobre la cantidad normal de esta electricidad que la llamaba positiva, daba lugar a la electrización vítrea y un defecto de electricidad producía electrización negativa o resinosa.

Encontramos más conveniente en nuestro presente estado

de conocimientos de los fenómenos eléctricos, mantener el concepto de dos tipos de electricidad como sugería Du Fay.

Estos tipos están presentes en cantidades iguales en los cuerpos neutros o descargados, si este equilibrio se perturba se dice que el cuerpo está cargado con el tipo de electricidad presente en exeso.

Las teorías desarrolladas anteriormente, vienen a ser ampliadas mediante la teoría del átomo, que es el resultado de modernos experimentos dentro de la Física atómica.

De todos es conocida la configuración del átomo, con un núcleo cuya carga positiva neta, determina la especie atómica o elemento químico y una nube extranuclear formado por un número entero de cargas negativas (electrones) formando una configuración característica, mantenida mediante fuerzas que al menos parcialmente son de la misma naturaleza que las que existen entre cargas macroscópicas.

Cuando a un átomo normal se le quita un electrón , resulta una partícula cargada positivamente, denominada ión positivo. Se puede medir el trabajo necesario para quitar un electrón a un átomo, encontrándose que ciertos electrones de la configuración, están ligados al núcleo más debilmente que otros.

En un estado de agregación sólido, los núcleos positivos y sus configuraciones electrónicas circundantes se mantienen en posiciones relativas fijas por ciertas fuerzas, debiéndose a esta estructura espacial rígida, la permanencia en forma adscrita al cuerpo sólido. En ciertos tipos de

sólidos la red espacial formada por las posiciones de los átomos que los constituyen es tal, que uno o dos de los electrones más libres, asociados en cada átomo no se mantienen rigidamente ligados, sino que influenciados por las cargas eléctricas próximas del sólido son capaces de moverse más o menos libremente a través de la red, siendo, no obstante, retenidos por los límites físicos del sólido, como las paredes de una caja.

Estos electrones libres se denominan "electrones de conducción".

Los tipos de sólidos que exhiben fenómenos que pueden ser interpretados, al menos en primera aproximación, por una visión cualitativa de esta clase se denominan conductores. Si todos los electrones constituyentes del sólido están ligados rigidamente a los átomos formando la estructura reticular sólida de forma que no es posible el movimiento relativo de cargas, la manera de comportarse del sólido será la de la clase de sustancias denominadas aisladoras, es por esto que si en cierta región se produce por frotamiento una carga positiva o negativa, ésta permanece en la región y no se distribuye como en el caso de un material conductor. (14)

Uno de los fenómenos observados en un conductor, ante la presencia de una carga en su proximidad, es el denominado influencia electrostática, que determina la acumulación de carga de signo contrario en el extremo próximo a la carga de prueba, dejando en el extremo más alejado una carga igual de

signo opuesto, fenómeno también llamado de "inducción electrostática".

Es posible determinar la magnitud y el signo de una carga, mediante una aplicación de este fenómeno de inducción, desarrollado en un aparato sencillo y muy conocido llamado electroscopio, aparato con el que se logra demostrar que este proceso de electrización es un proceso de separación de cargas, más no una producción, siendo esto imposible en cualquier proceso eléctrico.

Si es posible separar cargas, pueden construirse máquinas que operan de una manera continua, éstas se denominan "Máquinas estáticas o generadores electrostáticos", que operan bajo el principio de inducción. (L4)

1.2.2.- El Electrógrafo

Es un instrumento simple que consiste de una superficie plana de cera y una placa conductora con mango aislante. Se frota primero la cera con algún material, que, supongamos de ja sobre su superficie una carga positiva. Si se coloca la

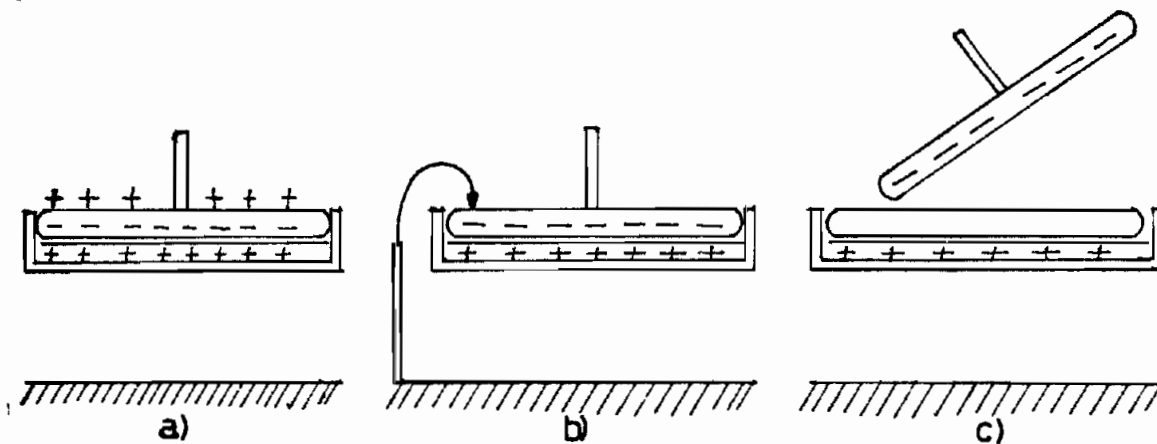


Fig. 1.6.- El electróforo. a) Disco metálico neutro que descansa sobre una superficie de cera cargada positivamente. b) La carga positiva en exeso se transmite a tierra a través de una conexión conductora. c) El disco retiene una carga negativa.

placa encima de la cera, una pequeña fracción de los electrones de conducción de la placa fluirán hacia los puntos de contacto con la cera, pero en realidad hay muy pocos puntos de contacto, y el mayor efecto es la separación de cargas en la placa, como se indica en la fig.1.6.

Si a continuación se pone en contacto la placa con tierra, la carga positiva de la cera atraerá electrones a la placa y cuando se suprime el contacto, la placa quedará con una carga neta negativa. Se puede entonces retirar la placa enpuñándola por el mango aislante, llevando con ella la carga negativa a cualquier lugar que se desée. Si se quita la carga por contacto con algún otro objeto, puede poner de nuevo la placa en la cera y repetirse el proceso. Se esta forma puede transferirse a cualquier objeto, por contactos repetidos con la placa, una cantidad indefinida de carga. (14)

1.2.3.- El geberador de Wimshurst

En el generador de tipo Wimshurst, discos de vidrio girando llevan consigo, lo que en realidad son placas de electróforos y producen este trasiego de carga en un proceso continuo.

La máquina se ilustra esquemáticamente en la Fig.1.7, y se ha representado un disco mayor que el otro, para efectos de esquema, las porciones sombreadas representan parches de hoja metálica conductora pegados a los discos.

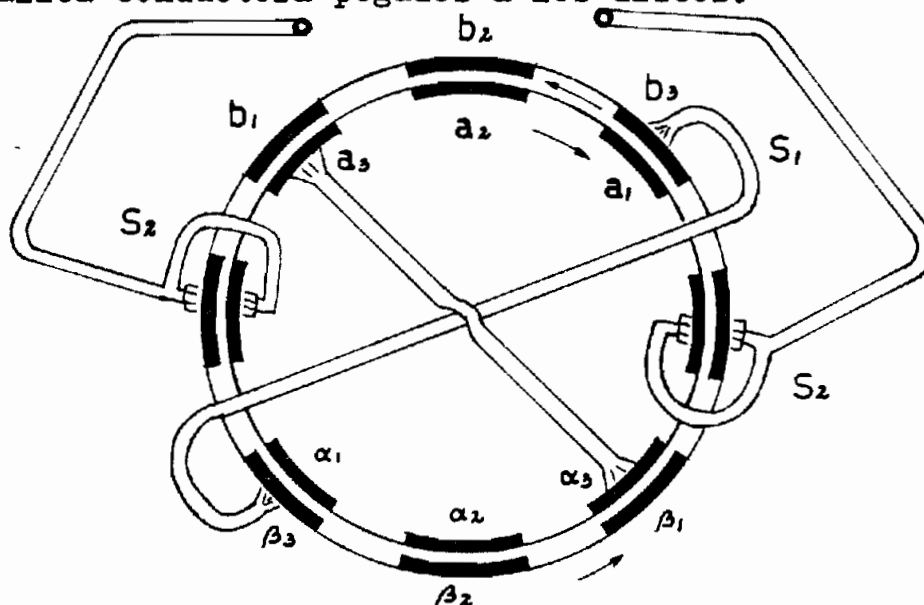


Fig.1.7.- Generador electrostático de Wimshurst

Los brazos S_1 y S_2 son metálicos aislados uno del otro y terminados en cepillos de alambre fino que frotan sobre los sectores metálicos, a medida que giran los otros contactos de los discos que conducen a los terminales, marcados + y - ; son de la forma de peines metálicos con puntas afiladas entre los cuales pasan los sectores conductores.

La acción de éstos es algo análoga a la de los contactos de escobilla. Si suponemos que la superficie debajo del peine está cargada positivamente, son atraídos electrones a las puntas del peine; bajo la influencia de fuerzas eléctricas intensas en las cercanías de las puntas, al aire circundante se vuelve conductor, las cargas positivas y negativas

de las moléculas que constituyen el aire, se separan, las cargas positivas pasan al peine, neutralizando su carga, y las negativas pasan al sector conductor.

El resultado efectivo es una transferencia de electrones de las puntas del peine al conductor que está enfrente.

Este proceso se conoce como "efecto corona" y es usado en dispositivos electrostáticos en el aire.

De esta manera pueden separarse carga en forma continua con la que se alimenta un sistema de electrodos (+ y -), siendo limitada por el efecto corona entre electrodos o la aparición de alguna chispa disruptiva. (14)

1.2.4.- Generador electrostático de Van der Graaff

El generador electrostático de Van der Graaff, es el más importante y fué desarrollado en 1.932 en MIT, Boston USA; es una máquina superior a la de Wimshurst, para la separación de grandes cantidades de carga y actualmente es de uso común en laboratorios de enseñanza de física nuclear.

La fig. 1.8, muestra el principio de funcionamiento del generador. La carga es esparcida en una banda aislante sin fin, que corre sobre dos cilindros metálicos, por medio de una punta de descarga de corona, la cuál está a algunos miles de voltios con respecto de tierra. La banda es empujada por medio de un motor y la carga es transportada al fin superior en donde es removida desde la banda por un punto de cargador conectado en el interior del electrodo metálico .

aislado, a través del cual pasa la banda. Para que la transferencia de carga sea más grande, el punto de rociado inferior, tiene un contraelectrodo plano (E), de modo que la capacidad entre D y E sea grande. (L3)

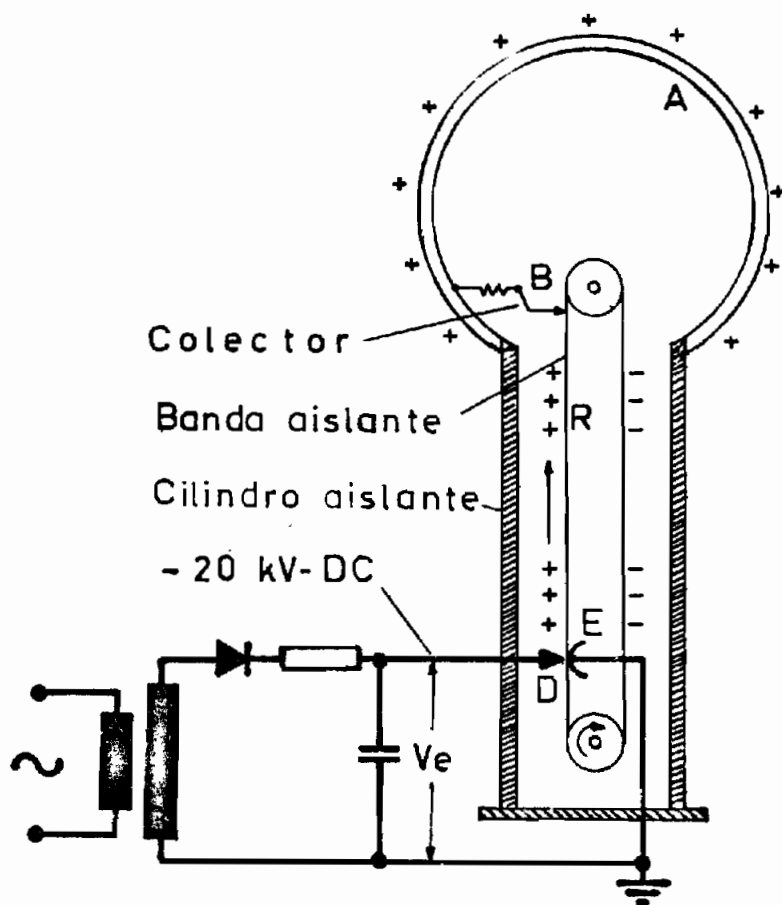


Fig.1.8.- Diagrama de un generador electrostático de Van der Graaff

El potencial del terminal de alto voltaje, a un instante es: $V = Q/C$, sobre el de la tierra, en donde Q es la carga acumulada y C es la capacitancia del electrodo a tierra.

La elevación de potencial del terminal está dado por

la razón:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{Q}{C} \right) = \frac{I}{C} \quad 1.3$$

En donde I es la corriente de carga neta en el terminal.

En la practica $\frac{dv}{dt}$, podría tender al valor de $1 \frac{Mv}{s}$ y el potencial final que aparecería en el electrodo de alto voltaje, podría ser infinito en la ausencia de pérdidas en el mecanismo de carga. Se establece el equilibrio, a un potencial tal, que la corriente de carga es igual a la corriente de descarga, la que incluye corriente de fuga, pérdidas de corona, y corriente en el circuito de prueba. (L5)

La figura del electrodo de alto voltaje debería ser tal que las descargas desde su superficie sean eliminadas y la distribución de campo entre el electrodo y tierra sea lo más uniforme, siendo de mucha ayuda, anillos metálicos adecuadamente graduados colocados en el campo.

Un arreglo auto-inductivo es comunmente usado, para rociar el lado opuesto de la banda con cargas de polaridad contraria, el ritmo de carga es por consiguiente doblado por la velocidad dada a la banda. Un sistema autogobernable es la conexión de la polea superior al colector de aguja, manteniéndola a un potencial elevado. (L5)

La carga transferida viene dada por la relación:

$$Q = b \cdot \sigma = V_e \cdot C_{DE} \quad 1.4$$

En donde:

b = ancho de la banda

σ = densidad de carga

La corriente suministrada a la banda, para una velocidad de transporte v (cm/seg), viene dad por:

$$I = \sigma \cdot v \cdot b \quad (\text{Amp}) \quad 1.5$$

b en cm.

σ en Coul/cm²

La intensidad de campo superficial E_t , sobre la superficie de la banda, depende de su resistencia de aislamiento, y la tensión a lo largo de la banda será:

$$V = E_t \cdot l \quad 1.6$$

en que l es la longitud de la banda. Utilizando las ecuaciones 1.5 y 1.6, se puede deducir la potencia de transferencia:

$$P = V \cdot I = E_t \cdot l \cdot \sigma \cdot v \cdot b \quad 1.7$$

por unidad de superficie:

$$P' = E_t \cdot \sigma \cdot v \quad 1.8$$

Como valores típicos, en aire a presión atmosférica normal, se tienen los siguientes valores:

$$\sigma = 2.10 \quad (\text{Coul/cm}^2)$$

$$E_t = 3 \quad \text{Kv/cm}$$

$$v = 2000 \text{ cm/seg}$$

La mayor parte de las primeras máquinas, operaban en

aire atmosférico, existe ahora la tendencia a encerrar el generador en una cámara presurizada, con el fin de obtener alto voltaje en menor espacio, se utilizan gases como N_2 , SF_6 , CO_2 , con disminución notable de las dimensiones y aumento del rendimiento. (L3)

Una de las principales ventajas de este generador electrostático, llamado también de banda portadora, es la flexibilidad y precisión, desde el punto de vista del voltaje de salida, el cual puede ser fácilmente controlado, con el régimen de alimentación a la banda. (L5)

Todos estos conceptos vertidos, además de las recomendaciones, serán en lo posible puestas de manifiesto en el diseño.

C A P I T U L O I I

TEORIA DEL CAMPO ELECTRICO

2.1.- Forma de los electrodos

Un proceso de separación de cargas, implica la presencia de dos electrodos aislados entre sí, formando un condensador; un electrodo de alto voltaje, el cual acumulará las cargas positivas arrastradas por la banda, y un electrodo de tierra, que contendrá a las cargas negativas.

Para objeto de diseño, el electrodo de tierra, puede ser considerado como una plataforma, es decir, una placa conductora infinita; en realidad, existen elementos indispensables para el funcionamiento del generador, los cuales hacen que el electrodo, pierda en parte su característica de placa infinita (rodamientos, eje, motor), elementos que de una u otra forma distorcionan el campo eléctrico. La influencia que presentan en el campo estos elementos, debe ser reducida al mínimo, a fin de que el electrodo no pierda sino en esta proporción sus características.

La configuración del campo, dentro del condensador, es la base para el escogitamiento de la forma del electrodo receptor de cargas, es decir un campo rigurosamente homogéneo, como el formado por dos placas paralelas infinitas, sería la solución ideal del problema, desde el punto de vista prácti-

co, esto es imposible; cualquier otra forma de electrodo de termina la formación de un campo no-homogeneo, dentro de es ta posibilidad, el campo es función inversa del radio de cur vatura, es decir, a menor radio de curvatura del electrodo, el campo es más fuerte, existiendo por lo tanto puntos crí ticos, determinados por la distancia mínima al contra-elec- trodo. Un electrodo receptor esférico presenta un radio de curvatura constante en todos sus puntos, siendo por esta ra zón, la forma escogida en el presente diseño, considerándola ideal, en primera instancia, para efectos de cálculo.

2.2.- Problema electrostático

Por las razones expuestas anteriormente, se ha escogido como electrodo receptor de carga, una esfera hueca, aislada de tierra, siendo por lo tanto indispensable, analizar el problema electrostático que se presenta y que puede ser dividido en dos partes:

- a) Demostrar que la esfera hueca, forma una superficie equipotencial, producto de una distribución de carga interior o configuración de cargas puntuales que simplifique el problema. Con esto se lograría obtener una ecuación del potencial como función de la carga y de la posición, en otras palabras determinar $V = f(q, x, y, z)$.
- b) Habiendo escogido como electrodo esférico, aquella superficie, cuyas dimensiones encajen en las limitaciones del diseño, determinar una función para encon trar el valor del campo eléctrico (E), en cualquier

lugar del campo, en especial en los puntos críticos, a fin de dimensionar convenientemente el aislamiento.

Dentro de un régimen estricto de resolución, estos problemas son sumamente complicados, estando el presente diseño, basado en su mayor parte, en el estudio del campo desde el punto de vista de la descarga. Sin embargo, el camino a seguirse en la resolución de estos problemas, viene a continuación explicado rápidamente, así como también un método para encontrar la capacitancia como un valor aproximado.

2.2.1.- Método de las imágenes

El método se basa en la premisa, de que las superficies equipotenciales, producto de dos cargas opuestas, tienden en su cercanía, a superficies cerradas, de la forma esférica distorsionada en los polos, simétricas con respecto al eje que une las cargas. La superficie equipotencial central, para la cual $V = 0$, es una superficie infinita que puede ser reemplazada por un plano conductor infinito.

Si se coloca una carga q , puntual, a una distancia d de un plano conductor conectado a tierra (Fig.2.1.a), existe una redistribución de electrones en el metal, teniéndose una superficie cargada negativamente, con un máximo en el punto O .

La creación de esta superficie cargada es llamada "carga por inducción" y el resultado es la fuerza entre la carga y el plano conductor, cuyo valor puede ser encontrado sí

se conoce la densidad de carga en el plano y el campo eléctrico producido.

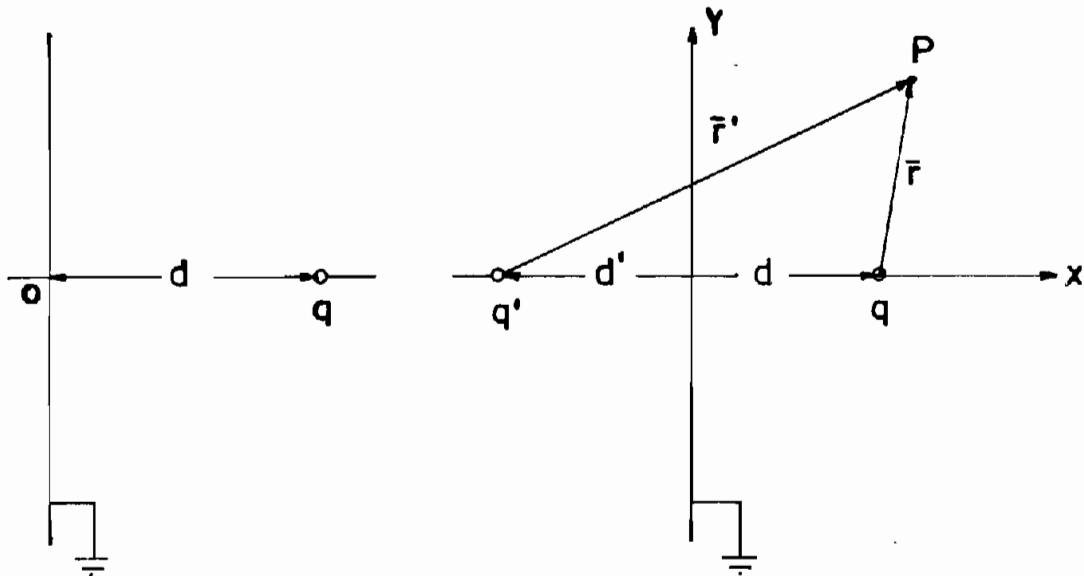


Fig.2.1.- Imagen de una carga puntual en un plano conductor, conectado a tierra

Afin de comprender el problema, suponemos la presencia de una carga q' , a una distancia d' , como se indica en la Fig. 2.1.-, e ignoramos momentaneamente la presencia del plano conductor. El potencial en un punto arbitrario P, está dado por la ecuación:

$$V = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \left(\frac{q}{r} + \frac{q'}{r'} \right) \quad 2.1$$

Para que $V = 0$, en el punto $x = 0$ (plano YZ), se impone las condiciones:

$$q' = -q \quad \text{y} \quad d' = d \quad 2.2$$

Geométricamente esto corresponde a la posición de la imagen en un espejo plano, de ahí el nombre del método.

Reemplazando el equipotencial $V = 0$, por un plano conduc-

tor, pueden ser dibujados los equipotenciales, así como las líneas de fuerza, siendo su estructura similar a la que ofrece un arreglo de dos cargas puntuales, separadas $2d$, tomándose solamente la mitad. (L6)

Las ecuaciones que nos permiten dibujar las líneas de fuerza, pueden ser deducidas de la evaluación de las siguientes proporciones:

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z} \quad 2.3$$

En el plano XY, para un arreglo de dos cargas puntuales de signo contrario, separadas por una distancia $2d$, la ecuación de las líneas equipotenciales es:

$$\frac{(x - d)}{\sqrt{(x - d)^2 + y^2}} - \frac{(x + d)}{\sqrt{(x + d)^2 - y^2}} = C \quad 2.4$$

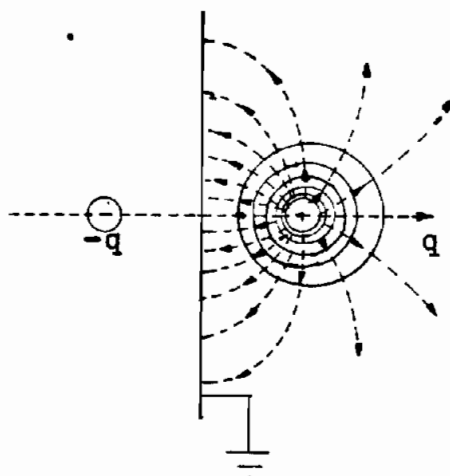


Fig. 2.2.- Líneas de fuerza y equipotenciales entre una carga puntual y un plano conductor

La intensidad de campo, en el plano, es normal, como

Se muestra en la Fig.2.3, y tiene un valor:

$$E_n = - 2 \left(\frac{q \cos\theta}{4\pi \epsilon_0 r^2} \right) = - \left(\frac{q d}{2\pi \epsilon_0 r^3} \right) \quad 2.5$$

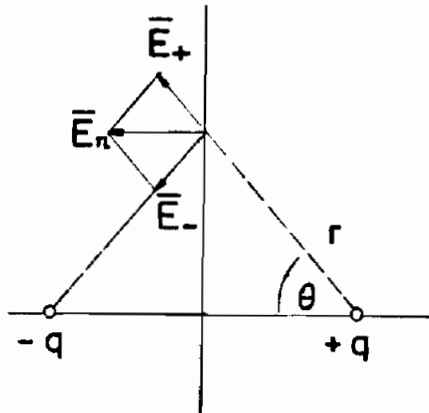


Fig.2.3.- Determinación de la carga superficial inducida en un plano por una carga puntual

La densidad de carga inducida en el plano, puede ser obtenida de la relación:

$$E_n = \frac{q_s}{\epsilon_0} \quad 2.6$$

$$q_s = \frac{- q d}{2\pi r^3} \quad 2.7$$

Esto demuestra que la densidad de carga inducida es inverversamente proporcional al cubo de la distancia desde el plano a la posición de q.

Se puede verificar que la carga total inducida en el plano es igual a - q, evaluando la integral:

$$q_p = \int_0^{\infty} q_s \cdot ds = - q \quad 2.8$$

La fuerza entre la carga y el plano es la misma que entre la carga y su imagen:

$$F = \frac{-q^2}{16\pi\epsilon_0 d} \quad 2.9 \quad (L6)$$

2.2.2.- Potencial de una carga exterior a una esfera

Analisis para encontrar el potencial producido por una carga puntual q , localizada a una distancia $d > R$, desde el centro de una esfera conductora perfecta de radio R , como se muestra en la Fig.2.4.- Se asume que la carga imagen q' está localizada sobre la línea que une la carga q con el centro de la esfera y a una distancia $b < R$ desde el centro.

El potencial en la superficie de la esfera está dado por:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{(R^2 + d^2 - 2 R d \cos\theta)^{1/2}} + \frac{q'}{(R^2 - b^2 - 2 R d \cos\theta)^{1/2}} \right)$$

2.10

En donde θ es el ángulo polar mostrado en la Fig.2.4

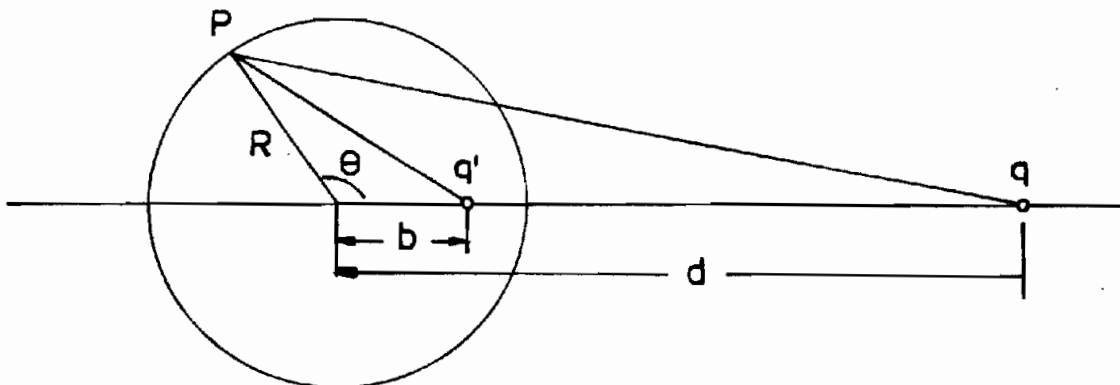


Fig.2.4.- Carga puntual y esfera conductora

Los valores de b y q' , son posibles conocer solo en el caso de tener la condición de borde $V = 0$, en este caso:

$$q' = - \frac{R}{d} q \quad 2.11$$

$$b = \frac{R^2}{d} \quad 2.12$$

La combinación de una carga original q y la carga imagen q' , producen como equipotencial una superficie esférica, sin distorsión del campo producido por una esfera conductora y la carga puntual q .

2.2.3.- Potencial producido por una esfera cargada

Considerar finalmente, el problema de determinar, el potencial producido por una esfera cargada de radio R a una distancia $d/2$, de la normal a un plano conductor infinito, como se muestra en la Fig.2.5. La situación requiere de un infinito número de cargas imágenes para producir el potencial correcto. Primero una carga q_1 , es colocada en el centro de la esfera, que hace de ésta una superficie equipotencial, más el plano no constituye un equipotencial; por la teoría anterior, el plano es una superficie equipotencial, solo si se coloca una carga imagen $q_1' = q_1$, a la izquierda del plano a una distancia $d/2$ sobre la línea que pasa por el centro de la esfera y es normal al plano. El potencial de estas dos cargas es una aproximación del potencial deseado.

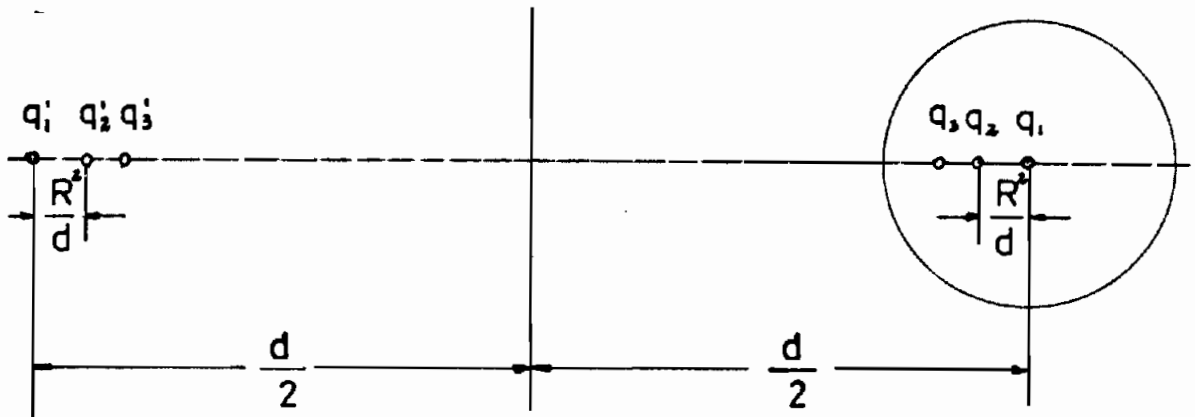


Fig. 2.5.- Esfera conductora y plano conductor

La segunda aproximación es obtenida añadiendo una carga $q_2 = Rq_1/d$, a una distancia R^2/d a la izquierda de q_1 , la que hace de nuevo a la esfera un equipotencial y luego se añade una carga $q_2' = q_2$ a la distancia R^2/d a la derecha de q_1' la que restituye al plano su característica de equipotencial. Con aproximaciones sucesivas, siguiendo este proceso se logra una serie que generalmente es convergente. Con el potencial obtenido de esta manera, la carga puede ser deducida, aplicando el Teorema de Gauss. Dando al plano un valor de potencial cero, la capacitancia es la relación de la carga al voltaje o diferencia de potencial entre plano y esfera, esta relación viene aproximadamente dada por la serie:

$$C = 4\pi \epsilon_0 R \left(1 + m + \frac{m^2}{1 - m^2} + \frac{m^3}{1 - 2m^2} - \dots \right) \quad 2.13$$

Donde:

$$m = \frac{R}{d}$$

2.14

El voltaje es una constante de diseño, la capacitancia puede calcularse con la fórmula anterior, y la carga máxima transferida puede ser conocida, al igual que la energía acumulada. Con el fin de encontrar todos los parámetros para el cálculo de estas constantes, es indispensable primero el dimensionamiento del aislamiento, el cual se lo hará en base a la teoría del campo desde el punto de vista de la descarga. (L7)

2.3.- Aislamiento

El aislamiento más universal y más barato es el aire a condiciones de presión y temperatura del lugar de funcionamiento del aparato, esto no incluye ningún elemento aditivo dentro del diseño, pero sí establece rigurosas normas preventivas que aseguran el funcionamiento normal.

En las proximidades de la superficie terrestre, el aire está formado esencialmente por una mezcla de 71.8% en volumen de moléculas de nitrógeno, 29.9% de oxígeno, 0.9% de argón, 0.03% de CO₂, y en cantidades muy pequeñas otros gases nobles, ácido carbónico, a veces ozono además de agua en estado gaseoso.

Aparte de las moléculas de dichas sustancias, se aprecia también la existencia de iones positivos y negativos de los gases mencionados, de electrones libres y radioemanación.

La concentración máxima de vapor de agua, en función de

de la temperatura, se indica en la tabla siguiente:

Tabla 2.1.- Contenido de vapor de agua de aire saturado

t°C	gr/cm
- 10	2.1
0	4.8
10	9.4
20	17.3

El aire seco posee una humedad por debajo del 50% de los valores indicados en la Tabla 2.1, el aire normal del 70 al 85% y el aire húmedo un 90% o más.

Tomado por unidad la densidad del aire a 20°C y 760 Torr la densidad a cualquier presión barométrica b y temperatura t, viene dada por la fórmula:

$$\delta = \frac{(273 + 20) b}{(273 + t) 760} = \frac{0.385 b}{273 + t} \quad 2.15$$

Según la teoría cinética de los gases, las moléculas y los iones se encuentran permanentemente en movimiento desordenado. La velocidad media puede expresarse en función de la temperatura para la fórmula:

$$v_o^2 = Kte \times T \quad 2.16$$

siendo v_o la velocidad media y T la temperatura absoluta.

La producción de iones puede producirse por procesos de choque o bien como efecto de las radiaciones electromagnéticas.

El aire sometido a la acción de un campo eléctrico, se verá atravesado por una corriente, es decir que se comporta como un conductor en grado mínimo, esto es posible si el ai re se encuentra ionizado. La descarga es distinta en género e intensidad, según la forma y magnitud de los campos eléctricos. (L1)

2.3.1.- Teoría de la descarga en los gases

Definamos los siguientes conceptos generales:

- Rigidéz Dieléctrica (Ed), es la propiedad de los aislantes de resistir un esfuerzo dieléctrico. Se expresa en términos de Intensidad de campo máxima, antes de que se produzca la descarga. Puede también expresarse como voltaje de resistencia (Withstand Voltage, CEI-Pub. 70) y se supone que deberá ser el valor máximo de voltaje que puede aplicarse a una muestra determinada, sin que se produzca la descarga.
- Voltaje disruptivo (Vd), es el valor de la tensión con el cual se produce la descarga .
- El término descarga disruptiva se usa generalmente para describir el fenómeno asociado con la falla del aislamiento bajo un esfuerzo eléctrico y el consiguiente colapso del voltaje y el paso de corriente.
- El término "Contorneo" o alternativamente descarga, se usa para describir el fenómeno disruptivo en un gas o líquido, por la superficie de un material aislante sólido.

El proceso de la descarga es explicado por el denominado mecanismo de Townsend , quién introdujo el concepto de la constante de ionización (α) o primer coeficiente de Townsend. Este es igual al número de pares de iones creados por un portador de cargas negativas, al recorrer 1 cm de su trayectoria en la dirección del campo E, en cada punto α es función de campo, y si éste es suficiente a los efectos de ionización por choque, la densidad de corriente aumenta; para el caso de iones positivos define un coeficiente similar , según Schumann, los valores de α y β son los siguientes:

Tabla 2.2.- Constantes de ionización

E = 30.4	38.0	45.6	60.8	76.0 kV/cm
$\alpha = 14.4$	42	84	270	550
$\beta = 0$	0.0004	0.028		

En este proceso de ionización, se producen iones positivos, cuya energía es mayor que la de los electrones y que al chocar con el cátodo, acelerados por el campo, producen electrones por desprendimiento, lo que se denomina "emisión secundaria", definiéndose un nuevo coeficiente, denominado, de emisión secundaria o segundo coeficiente de Townsend (γ) y que depende del material con el que está construido el cátodo.

Para que exista la descarga perfecta, la corriente debe tender a un valor infinito, cumpliéndose para esta condición

que:

$$\ln \frac{1}{\gamma} = \int_0^x \alpha dx \quad 2.17$$

Siendo dx , diferencial de longitud, en la dirección del campo eléctrico.

Tomando en cuenta la ley de Paschen, sobre presión, y la temperatura referida a condiciones normales, el voltaje disruptivo puede escribirse:

$$Vd = C2.p.s.\ln\left(\frac{\ln(1 - 1/\gamma)}{C1.p.s}\right) \quad 2.18$$

En donde $C1$ y $C2$ son constantes de integración, p presión y s la separación de los electrodos. Esta ecuación resulta difícil aplicar en la práctica, por su complejidad; Townsend deriva fórmulas empíricas para calcular Vd en función de la distancia, para condiciones normales de presión y temperatura y para electrodos que formen un campo homogéneo:

Para $s < 0.1$ cm

$$Vd = 30. s - 1.35 \quad 2.19$$

$$Ed = 30 - \frac{1.35}{s} \quad 2.20$$

Para separaciones mayores:

$$Vd = 24.5 s - \frac{7}{s} \quad 2.21$$

$$Ed = 24.5 s - \frac{7}{s} \quad 2.22$$

s en cm, Vd en kV y Ed en kV/cm

2.3.2.- Descarga en campos homogéneos

Se entiende por campo homogéneo, a aquel en que la intensidad de campo permanece constante en cualquier punto del campo. En la práctica se aproximan mediante placas paralelas de bornes redondeados, de tal modo que la intensidad de campo en los extremos no sea mayor que de la parte central.

La rigidez dieléctrica del aire, aún para campos homogéneos, no es una constante, sino que depende de la separación entre las placas.

En el gráfico de la Fig. 2.6 , puede verse el comportamiento de E_d en función de la separación s para electrodos planos.

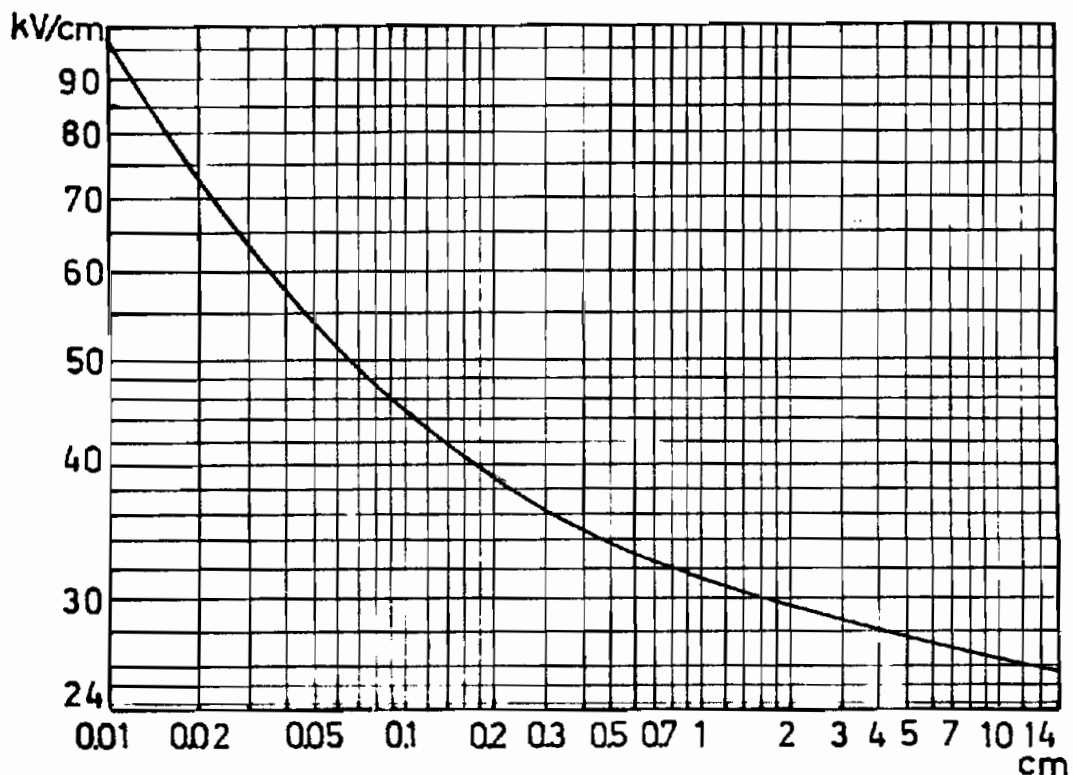


Fig. 2.6.- Rigidez del aire para electrodos planos en función de la separación (Cond. Nor.)

La corrección para densidad relativa del aire diferente de la unidad, se expresa del siguiente modo:

$$k = \frac{Ed}{Ed_0} \quad 2.23$$

Ed_0 es la rigidez del aire a condiciones normales de presión y temperatura. (L3)

$$k = \frac{3.5 \sqrt{s} \cdot \delta - \sqrt{\delta}}{3.5 \sqrt{s} - 1} \quad 2.24$$

2.3.3.- Descarga en campos no-uniformes

En campos no-uniformes, la intensidad del campo depende del sitio en que se mida y consecuentemente el primer coeficiente de Townsend no es constante. La condición crítica de disrupción será:

$$\ln \frac{1}{\gamma} = \int_0^x \alpha dx, \quad 2.25$$

En la práctica las tensiones disruptivas pueden calcularse solamente para campos que tengan solamente un cierto grado de no-uniformidad, en otros casos deberá hacerse experimentación, utilizando equipo adecuado de prueba y medición .

Por estos métodos se han establecido curvas, así, para la rigidez dieléctrica del aire a condiciones normales, Schuman ha determinado, para diferentes configuraciones de electrodos, como puede verse en la Fig.2.7.

(L3)

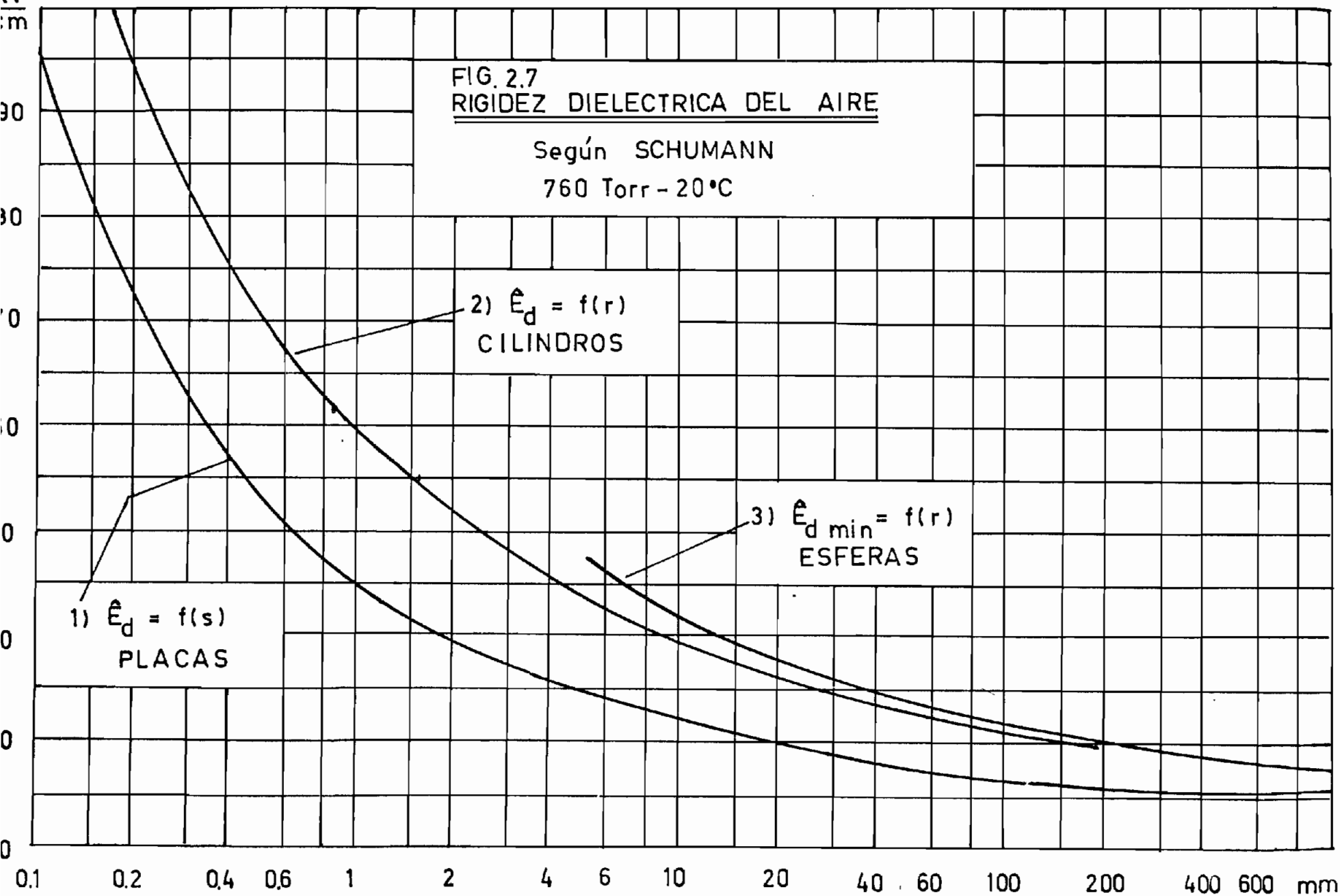
2.3.3.- Descarga en campos fuertemente no-homogeneos

kV
cm

FIG. 2.7
RIGIDEZ DIELECTRICA DEL AIRE

Según SCHUMANN

760 Torr - 20°C



En campos no uniformes existe la particularidad de que cuando se supera, la intensidad de campo crítica, en algún punto del campo, no se produce la descarga total inmediata, sino que aparecen descargas parciales en la zona de máxima intensidad de campo ($E_{máx}$), al principio en forma silenciosa y después en forma de chisporroteo, hasta que un aumento de tensión produce la descarga. En el caso de electrodos punta-punta con separaciones mayores que 20 cm, el voltaje de descarga puede ser calculado por la fórmula empírica:

$$V_d = 24 - 4.4 s \quad 2.26$$

s en cm y Vd en kV
(L3)

2.3.4.- La perforación del aire según Schwaiger

Resulta sumamente laborioso el cálculo de la intensidad de campo por métodos analíticos como pudo constatarse en la parte primera de este capítulo. A. Schwaiger desarrollo un método más simple, relacionando la intensidad de campo disruptiva con la intensidad de campo homogénea ideal. El cálculo se basa en las siguientes consideraciones:

Para el caso de un condensador de placas paralelas:

$$V_d = E_d \cdot s \quad 2.27$$

Para el caso de esferas concéntricas:

$$V_d = E_d \cdot \frac{r_1 (r_2 - r_1)}{r_2} \quad 2.28$$

Siendo:

r_1 = Radio de la esfera interior

r_2 = Radio de la esfera exterior

En el caso de cilindros coaxiales:

$$V_d = E_d \cdot r_1 \ln \frac{r_2}{r_1} \qquad 2.29$$

Es decir que en todos los casos, la tensión de perforación es igual a la rigidez dieléctrica correspondiente, multiplicada por cierto factor que depende de las características geométricas del arreglo de electrodos. Este factor lo designa Schwaiger, con el nombre de "distancia ficticia" (α) y tiene los siguientes valores para los arreglos analizados:

Placas paralelas	$\alpha = s$
Esferas concéntricas	$\alpha = \frac{r_1 (r_2 - r_1)}{r_2}$
Cilindros coaxiales	$\alpha = r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}$

Como se vé, en el condensador de placas paralelas, la distancia ficticia α es igual que la separación real. Para esferas concéntricas dicha distancia α es menor que la separación real, $s = r_2 - r_1$. Lo mismo puede decirse de los cilindros coaxiales, puede establecerse en general que : la distancia ficticia α es menor que la separación real s para electrodos que forman campos no homogéneos y solo para homogéneos ideales $\alpha = s$.

De tener varios dispositivos aislantes con el mismo material dieléctrico y la misma rigidez dieléctrica E_d , además de la separación s , la máxima tensión de perforación

la tendrá el arreglo que posea la mayor distancia ficticia.

De aquí se desprende que: a mayor distancia ficticia, mayor voltaje de perforación.

Aún para el caso de un condensador real de placas paralelas, s no es igual a α , sino que α es algo menor. En consecuencia un dispositivo aislante es tanto mejor cuando la relación α/s se acerca a la unidad. (18)

A esta relación α/s se la denomina "coeficiente de utilización de Schwaiger" ó "factor de aprovechamiento" ó "grado de homogeneidad del campo" y se lo representa con la letra Eta (η).

Luego :

$$\eta = \frac{\alpha}{s} \quad 2.30$$

Por consiguiente:

$$Vd = Ed. s . \eta \quad 2.31$$

Este factor η viene también determinado por la relación:

$$\eta = \frac{E_{medio}}{E_{máx}} \quad 2.32$$

El valor de E_{medio} está definido por la relación entre el voltaje aplicado y la separación entre electrodos (Vd/s) y $E_{máx}$ es la intensidad de campo máxima obtenida en el campo.

La distancia ficticia, así, como el coeficiente de utilización son función directa de las características geométricas de los electrodos (radios de curvatura), en el punto de mínima separación s y también de esta distancia .

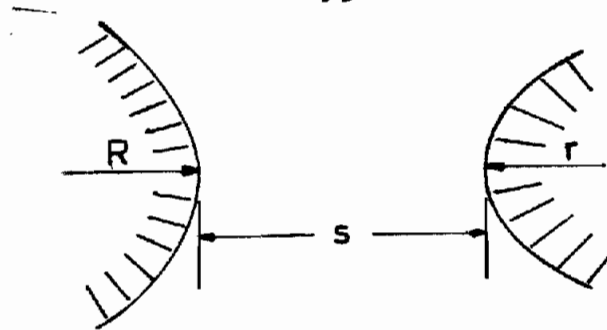


Fig.2.8.- Sistema general de electrodos

Se definen las magnitudes siguientes:

$$p = \frac{s - r}{r} \quad \text{y} \quad q = \frac{R}{r} \quad 2.33$$

Siendo:

R = Radio de curvatura mayor

r = Radio de curvatura menor

s = Separación real mínima

Introduciéndo estas dos magnitudes de carácter geométrico, se tiene que:

$$\eta = f(p, q) \quad 2.34$$

Esta función viene dada por curvas, especificadas para cada uno de los sistemas de electrodos de carácter no homogéneo, curvas determinadas en base a la experimentación, conocidas las dimensiones de los electrodos se puede calcular p y q y encontrar en las curvas el valor de η :

Generalizando la ecuación 2.31, se tiene que:

$$V_d = E_d(r, s) \cdot s \cdot \eta(p, q) \quad 2.35$$

El voltaje V_d no es necesariamente , aquel que produce

la descarga global, sino el de iniciación de descargas parciales, pues en campos fuertemente no-homogeneos se observa este fenómeno denominado "corona". (L3)

2.3.5.- Coeficiente de seguridad

Se denomina coeficiente de seguridad (k_s), a la relación entre el voltaje de descarga V_d y el voltaje de diseño o de instalación V , que constituye el voltaje de funcionamiento del artefacto aislante.

$$k_s = \frac{V_d}{V} \quad 2.36$$

Este coeficiente es siempre mayor que la unidad y determina el rango de seguridad de funcionamiento.

Por analogía, se puede escribir:

$$k_s = \frac{E_d}{E} \quad 2.37$$

Siendo E , la intensidad de campo máxima de funcionamiento. Generalizando:

$$V = E \cdot s \cdot \eta \quad 2.38$$

Con un conocimiento de lo que es un generador electrostático y del campo crítico que se produce en un proceso de separación de cargas, se puede entrar al diseño de los elementos, tomando en cuenta todos estos conceptos y recomendaciones vertidas hasta este punto. (L8)

C A P I T U L O I I I

DISEÑO DE LOS ELEMENTOS ESTATICOS DEL GENERADOR DE VAN DER GRAAFF

Se llaman elementos estáticos, a las partes del generador que permanecen estacionarias, estos elementos son los electrodos, los cuales determinan la configuración del campo eléctrico. El condensador estará luego formado por un electrodo receptor de cargas, que tendrá la configuración de una esfera hueca y un contraelectrodo de tierra de características planas; cada uno de estos elementos estarán sujetos a las irregularidades necesarias propias del diseño e indispensables para el correcto funcionamiento.

El condensador tendrá por diseño, una diferencia de potencial de un MILLON DE VOLTIOS.

La intensidad de campo máxima, no excederá a la rigidéz dieléctrica del aire, para esta configuración y para condiciones de funcionamiento de la E.P.N., se tomará en cuenta presión y temperatura correspondiente a la vez medidas para evitar las pérdidas por efecto corona.

La energía acumulada no tiene importancia primordial en el presente diseño, así como también la transierencia de potencia, siendo de muy poco interés la corriente de carga que pueda ser suministrada por el generador.

Todos los elementos del generador podrán ser construidos en la industria o conseguidos facilmente en el mercado.

Estas consideraciones serán tomadas en cuenta para el di seño definitivo, siendo indispensable un sobredimensionamiento a fin de asegurar el funcionamiento normal y compensar e rrores que pueden haberse cometido o consideraciones que por no estar al alcance, no se han tomado en cuenta.

3.1.- Análisis sobre un arreglo ideal

El método desarrollado por Schwaiger, más sencillo, que los métodos analíticos, determina la siguiente relación:

$$V_d = E_d(r,s) \cdot s \cdot \eta(p,q) \quad 3.1$$

La rigidez dieléctrica es función de la separación (s), y del radio de curvatura (r), en general estas variables están en todos los elementos de la relación anterior, constituyéndose en las incógnitas del diseño. Para obviar este problema, escogemos un valor típico de rigidez dieléctrica, a condiciones normales, para el caso de placas paralelas, que forman un campo idealmente homogéneo, es conocido el valor $E_{d_0} = 30 \text{ kV/cm}$, el cual debe ser corregido para condiciones de funcionamiento. El factor de corrección k, para obtener el valor de la rigidez dieléctrica a condiciones diferentes a las normales, es función de la densidad relativa del aire que a su vez es función de la presión b y la temperatura t,

$$\delta = 0.386 \frac{b}{273 + t} \quad 3.2$$

Para las condiciones del Laboratorio de Alta Tensión de la E.P.N., las condiciones, con una variación mínima, son:

$$t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$b = 540 \text{ Torr}$$

Por lo tanto:

$$\delta = 0.711$$

El valor de k , para este valor de δ , puede interpolarse entre los valores de la tabla siguiente:

Tabla 3.1.- Factores de corrección de presión y temperatura, función de la densidad relativa, para el aire.

0.7	0.75	0.80	0.85	0.90
0.72	0.77	0.81	0.86	0.91

De lo anterior se tiene:

$$k = 0.711$$

Para las nuevas condiciones, el valor de la rigidez dieléctrica, tendrá un valor:

$$Ed_Q = k Ed_o$$

3.3.

$$Ed_Q = 21.35 \text{ kV/cm}$$

A este valor, debe aplicarse el concepto de coeficiente de seguridad (k_s). En el presente estudio, se analiza un caso antipráctico y un mejoramiento del mismo, base del dimensionamiento definitivo.

El caso ideal, está representado en la Fig. 3.1

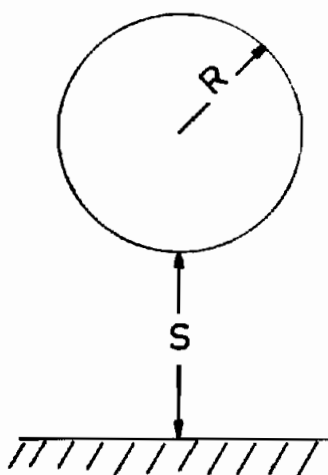


Fig. 3.1.- Arreglo ideal esfera-plano

3.1.1.- Análisis para $k_s = 2.135$ ($E = 10$ kV/cm)

Datos:

$$V = 1 \text{ MV}$$

$$E = 10 \text{ kV/cm}$$

$$q = \text{infinito}$$

Se dan valores a η , de las curvas del apéndice se determina p , y se calcula s y R , con las siguientes relaciones:

$$s = \frac{100}{\eta} \quad 3.4$$

$$R = \frac{s}{p - 1} \quad 3.5$$

Las curvas $\eta = f(p)$, dadas en el apéndice, son logarítmicas, por lo tanto es en la evaluación de este valor en donde se producen errores.

Tabla 3.2.- Parámetros de un arreglo esfera-plano, calculados por el método de Schwaiger, para $E = 10 \text{ kV/cm}$

$\eta\%$	s(cm)	p	R(cm)
10	1000	10.4	106.38
15	666.7	7.2	107.53
20	500	5.42	113.12
25	400	4.37	118.69
30	333.3	3.68	124.37
35	285.7	3.18	131.06
40	250	2.82	137.36
45	222.2	2.5	148.13
50	200	2.26	158.73
60	166.7	1.83	200.84

A simple vista, puede deducirse que estas dimensiones son antiprácticas; por ejemplo, para $\eta\% = 10\%$, el radio de la esfera puede estar dentro de los valores aceptables de construcción, pero su aislamiento ($s = 10 \text{ m}$), es demasiado grande, haciendo del diseño más complejo, por las protecciones necesarias que deberían estar presentes para evitar vibraciones, además del gran desperdicio de material.

Es pues conveniente, reducir el valor del coeficiente de seguridad, con el fin de conseguir un aumento en el valor de la intensidad de campo máxima, procurando no exeder el valor de la rigidez dieléctrica para estas condiciones.

3.1.2.- Análisis para $k_s = 1.42$ ($E = 15$ kV/cm)

Datos:

$$V = 1 \text{ MV}$$

$$E = 15 \text{ kV/cm}$$

$$q = \text{infinito}$$

Relaciones:

$$s = \frac{66.67}{\eta} \quad 3.6$$

$$R = \frac{s}{p - 1}$$

Tabla 3.3.- Parámetros de un arreglo esfera-plano, calculados por el método de Schwaiger, para $E = 15$ kV/cm

η %	s(cm)	p	R(cm)
10	666.7	10.4	70.93
15	444.5	7.2	71.69
20	333.4	5.42	75.43
25	266.6	4.37	79.11
30	222.2	3.68	82.91
35	190.5	3.18	87.39
40	166.7	2.82	91.59
45	148.2	2.5	98.80
50	133.3	2.26	105.79

Los valores de s y R , han mejorado desde el punto de vista de la construcción, sinembargo la intensidad de cam-

po es un valor, que puede decirse, es cercano al valor de la rigidez dieléctrica, cualquier elemento complementario del diseño puede alterar el campo en magnitud tal que cope la diferencia, riesgo que debe ser disminuido con sobredimensionamiento o elementos que estabilicen en parte el campo eléctrico.

3.2.- Electrodo receptor real

En la realidad el electrodo receptor de cargas, no podrá tener la configuración de una esfera hueca ideal, sino que estará despojada de un casquete polar, en su parte inferior, con el fin de dar paso a los elementos aislantes soportes de la estructura y elementos portadores de carga.

Una discontinuidad brusca, en el corte del casquete polar, determinaría la presencia de un filo, que semejaría una punta, haciendo del campo fuertemente no-homogeneo con alteración notable de la intensidad que en este punto superaría a la rigidez dieléctrica.

Es importante mejorar esta discontinuidad, haciéndola que su remate sea más suave, una de las maneras es la terminación en un anillo cilíndrico cuyo radio de curvatura determinará la configuración del campo en su parte más crítica.

El detalle puede verse en la Fig. 3.2.

El campo crítico estará luego determinado por un arreglo electródico cilindro-plano, que lleva a un nuevo dimensionamiento, con esta nueva ingognita, radio de curvatura del anillo cilíndrico.

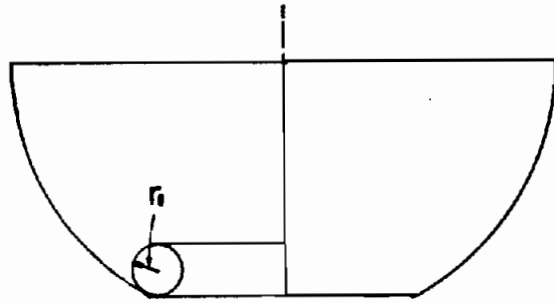


Fig.3.2.- Corte de semiesfera inferior, del electrodo receptor

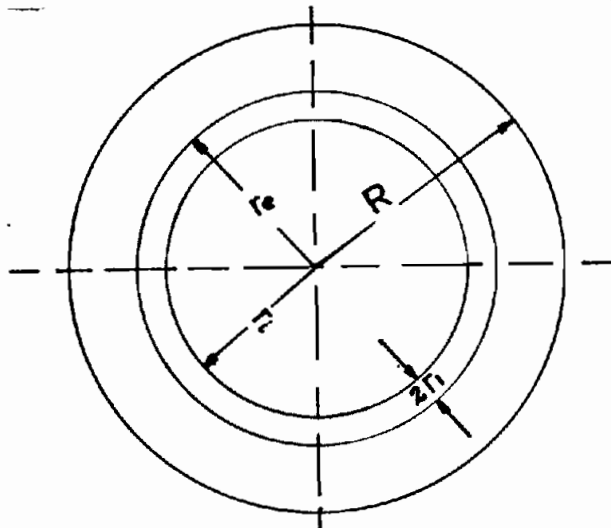


Fig.3.3.- Vista inferior de semiesfera

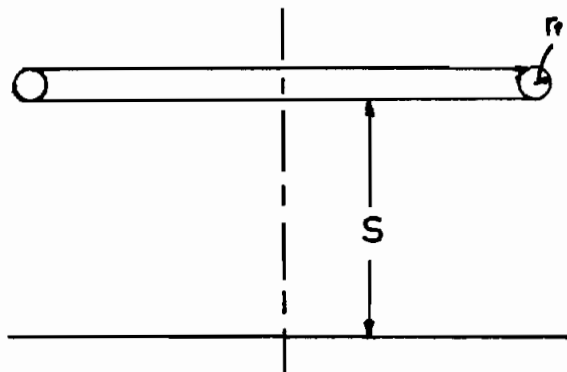


Fig.3.4.- Arreglo electródico cilindro-plano

Aplicamos los mismos conceptos, y seguimos el mismo método que para el cálculo de los parámetros de la esfera

3.2.1.- Análisis para $k_s = 2.135$ ($E = 10$ kV/cm)

Datos:

$$V = 1 \text{ MV}$$

$$E = 10 \text{ kV/cm}$$

$$q = \text{infinito}$$

Relaciones:

$$s = \frac{100}{\eta}$$

3.7

$$r_1 = \frac{s}{p - 1}$$

Utilizamos las curvas de Schwaiger, para el caso de cilindro-plano, curvas del Apéndice.

Tabla 4.4.- Parámetros de un arreglo cilindro-plano, calculados por el método de Schwaiger, para $E = 10$ kV/cm

$\eta\%$	s(cm)	p	r1(cm)
5	2000	115	17.54
10	1000	45	22.73
15	666.67	26.5	26.14
20	500	18.2	29.07
25	400	13	33.33
30	333.33	10	37.04
35	285.71	7.9	41.41

Pueden coordinarse estos valores con los dados en la Tabla 3.2, en el caso de conservarse la misma distancia de aislamiento.

3.2.2.- Análisis para $k_s = 1.42$ ($E = 15$ kV/cm)

Datos:

$$V = 1 \text{ MV}$$

$$E = 15 \text{ kV/cm}$$

$$q = \text{infinito}$$

Relaciones:

$$s = \frac{66.67}{\eta} \quad 3.8$$

$$r_l = \frac{s}{p - 1}$$

Tabla 4.5.- Parámetros de un arreglo cilindro-plano, calculados por el método de Schwaiger, para $E = 15$ kV/cm

η %	s	s (cm)	p	r_l (cm)
5		1333.4	115	11.70
10		666.67	45	15.15
15		444.47	26.5	17.43
20		333.35	18.2	19.38
25		266.68	13	22.22
30		222.23	10	24.69
35		190.49	7.9	27.61
40		166.68	6.5	30.31
45		148.16	5.3	34.46
50		133.34	4.4	34.22

Estos valores deben coordinarse con los datos en la Tabla 3.3.

3.3.- Electrodo de tierra

Se ha supuesto que el electrodo de tierra es una placa plana infinita, sin embargo los elementos generadores del movimiento, así como los que transmiten este movimiento, deformarán estas características de plano conductor infinito.

Un método de redimensionamiento, sería el considerar cada uno de los radios de curvatura de los elementos deformadores del campo, trabajo muy arduo que no daría resultados positivos dentro del campo constructivo.

El método a seguirse en el presente estudio, es, considerar un sobredimensionamiento apreciable, transportando la posición de la placa paralela al nivel del eje del motor que produce el movimiento.

El diseño de anillos metálicos que incluidos en el campo, hacen que la distribución de potencial no sea tan rigurosa, mejorándola en un rango aceptable como para compensar las deformaciones sufridas por estos conceptos.

Evitar en lo posible perfiles que semejen a puntas, o radios de curvatura críticos.

Todas estas consideraciones solo pueden verificarse, si son o no efectivas, en pruebas realizadas sobre el modelo, ya que en el campo de la Alta Tensión, la experimentación es la base de su estudio y la definición de normas y conceptos.

3.4.- Dimensionamiento

El escoger el radio de la esfera (R), constituye el punto de partida para determinar las demás dimensiones, ésta puede escogerse de las tablas 3.2 y 3.3, tomándose en cuenta la factibilidad de construcción.

De la Tabla 3.3, un radio razonable sería el correspondiente a $\eta = 30\%$, es decir $R = 82.91$ cm, dando una distancia de aislamiento igual a $s = 2.22$ m .

La superficie receptora de considerarse esfera ideal tendría una Area igual a:

$$A = 4 \pi R^2 \quad 3.9$$

$$A = 8.43 \text{ m}^2$$

Como la esfera hueca, en la realidad está desprovista de un casquete polar, un aumento del radio compensaría esta pérdida de superficie, y un sobredimensionamiento compensaría las deformaciones de construcción que puedan haberse escapado, por lo que se escoge un radio de 87 cm.

Los elementos soportes y banda portadora necesitan de una distancia en corte de 35.5 cm., dato que se demostrará más adelante , según esto la superficie aprovechable del electrodo receptor, será:

$$A = 2 \pi R^2 + 2 \pi R \sqrt{R^2 - a^2} \quad 3.10$$

$$A = 9.098 \text{ m}^2$$

Como compensación y sobredimensionamiento, se tendrá:

$$\Delta R_c = 1.09 \text{ cm}$$

$$\Delta R_s = 3.1 \text{ cm}$$

Siendo:

ΔR_c = Aumento por compensación

ΔR_s = Aumento por sobredimensionamiento

El área calculada, será equivalente a tener una esfera ideal de radio $R_{eq} = 85.09 \text{ cm}$.

Se considera ahora, la dimensión del anillo- cilíndrico con el que remata la semiesfera inferior del electrodo receptor, para lo cual se analiza las Tablas 4.4 y 4.5.

Si se conserva constante, la distancia de aislamiento, de la Tabla 4.5, para $\eta = 30\%$, el radio de curvatura del cilindro es de $r_l = 24.69 \text{ cm}$; constructivamente este radio es antiprático, la superficie aprovechable disminuiría notablemente, detalle que puede observarse en la Fig.3.5, realizada a escala.

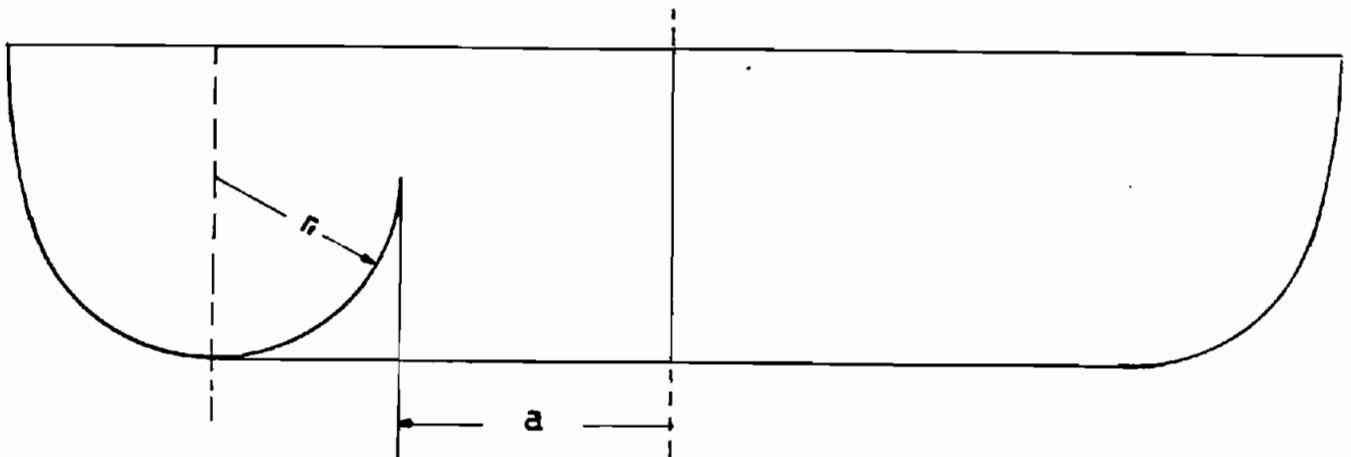


Fig.3.5.- Semiesfera inferior con $r_l = 25 \text{ cm}$

Se establece arbitrariamente, un radio de curvatura $r_1 = 10$ cm, logicamente que esta disminución habrá vuelto al campo crítico, problema que se analizará en el reajuste.

Con esta consideración el diseño se basaría en los detalles de la Fig.3.6.

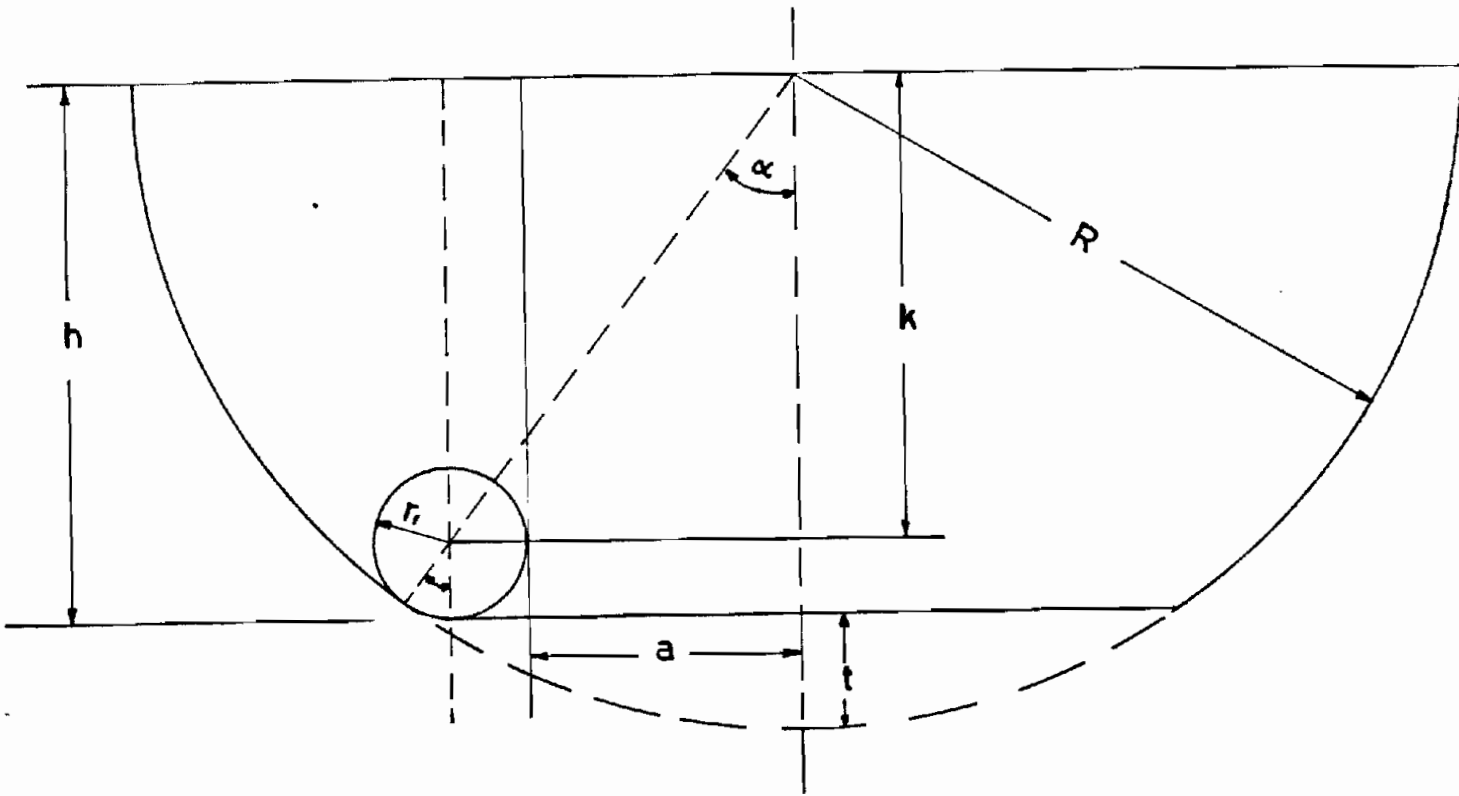


Fig.3.6.- Detalle del diseño de la semiesfera inferior del electrodo receptor.

Las dimensiones del anteproyecto, si es válido el término, serían las siguientes:

$$R = 87 \text{ cm}$$

$$r_1 = 10 \text{ cm}$$

$$a = 35.5 \text{ cm}$$

$$h = 72.12 \text{ cm}$$

$$t = 14.88 \text{ cm}$$

Por las razones expuestas anteriormente, la dimensión s debe ser también sobredimensionada adecuadamente, tomándose en cuenta el aspecto constructivo, la diferencia existente entre 2.22 m y 3 m puede ser aceptable y recomendable.

3.5.- Comprobación y reajuste

Despreciando, por el momento, la influencia en el campo del anillo-cilíndrico, remate de la semiesfera inferior, puede decirse que el electrodo receptor es una esfera de radio equivalente $Req = 85.09 \text{ cm}$, aislada de tierra por una distancia $s = 301.91 \text{ cm}$. (segi) Con estos nuevos datos se puede recalcular el valor de la intensidad de campo máxima, a la vez que del coeficiente de seguridad (ks).

Para los nuevos valores se tiene que:

$$p = \frac{s + Req}{Req} \quad 3.11$$

$$p = 4.55$$

$$q = \text{infinito}$$

De las curvas del Apéndice, para $p = 4.55$

$$\eta\% = 24.2\%$$

Luego:

$$E = \frac{V}{s \cdot \eta} \quad 3.12$$

$$E = 13.687 \text{ kV/cm}$$

De donde:

$$ks = 1.56$$

Valor que asegura un funcionamiento normal.

El mismo análisis, para el caso del anillo-cilíndrico, con las dimensiones arbitrarias tomadas en 3.4., es decir $r_1 = 10 \text{ cm}$ y $s = 314.88 \text{ cm}$

$$p = \frac{s + r_1}{r_1} \qquad 3.13$$

$$p = 32.49$$

$$q = \text{infinito}$$

De las curvas:

$$\eta\% = 13\%$$

Luego:

$$E = 24.43 \text{ kV/cm}$$

Este valor supera la rigidez dieléctrica del aire, para las condiciones de funcionamiento (21.35 kV/cm), lo cual es indicio de que van a existir pérdidas por efecto corona, sin embargo es cercano al valor límite permisible, por lo tanto resulta fácil el recalcular esta dimensión, tomándo radios ligeramente superiores a 10 cm.

La distancia s , tendrá un valor suma de los 300 cm, más la distancia t , altura del casquete polar y relativo a cada radio; puede eleborarse una tabla con valores de k, h, s, t en cm. y demás parámetros que determinan el campo eléctrico.

Siguiendo la nomenclatura de la Fig.3.6, se tiene:

$$k = \sqrt{(R - r_l)^2 - (a + r_l)^2} \quad 3.14$$

$$h = k + r_l \quad 3.15$$

$$t = R - h \quad 3.16$$

$$s = 300 + t \quad 3.17$$

$$p = \frac{s + r_l}{r_l} \quad ; \quad q = \text{infinito} \quad 3.18$$

$$E = \frac{V}{s \cdot \eta} \quad 3.19$$

$$k_s = \frac{Ed_Q}{E} \quad 3.20$$

Tabla 4.6.- Redimensionamiento de la esfera y aislamiento, parámetros del campo eléctrico

rl(cm)	k(cm)	h(cm)	t(cm)	s(cm)	$\eta\%$	p	E(kV/cm)	ks
10	62.12	72.12	14.88	314.88	13	32.5	24.43	.87
12	58	70	17	317	15	27.4	21.39	.998
15	51.32	66.32	20.68	320.68	17	22.4	18.13	1.18
16	48.9	64.9	22	322	18	21	17.25	1.24
18	43.6	61.6	25	325	19	19.1	16	1.33
20	37.5	57.5	29	329.5	21	17.5	14.81	1.44

Podría escogerse el valor límite, a fin de conseguir que ks sea igual a la unidad, un cambio insignificante de las condiciones de funcionamiento, acarrearían pérdidas por efecto co-

rona, siendo imposible el conseguir el voltaje fijado para el diseño.

Con el fin de presentar un rango de variación aceptable de las condiciones de funcionamiento, se ha escogido como ra dio de curvatura del cilindro, $r_1 = 15$ cm, con este dato, las nuevas dimensiones serían:

$$\begin{array}{ll} k = 51.32 \text{ cm} & h = 66.32 \text{ cm} \\ t = 20.68 \text{ cm} & s = 320.68 \text{ cm} \\ \eta\% = 17.2 & p = 22.38 \\ k_s = 1.18 & E = 18.13 \text{ kV/cm} \end{array}$$

3.6 .- Cálculo de parámetros

Definidas las dimensiones, se puede calcular los parámetros (peso, volumen, carga y capacidad), que intervendrán en el diseño de los elementos complementarios.

3.6.1.- Material y peso del electrodo receptor

El material común de construcción para esta clase de ele mentos es el Aluminio, por ser un material liviano, buén con ductor y lo suficientemente maleable, para ser trabajado y conseguir la forma deseada.

El espesor de la lámina, debe ser lo más fino, pero también lo suficientemente rígido, capaz de mantener su forma por lo cual se ha escogido como espesor $e = 1/16$ de pulg., lámina que puede ser conseguida en el mercado.

El área capaz de almacenar carga eléctrica es:

$$A = 9.95 \text{ m}^2$$

El volumen del material empleado :

$$U = 15.8 \text{ dm}^3$$

El peso específico del Aluminio es $\gamma = 2.7 \text{ gr/cm}^3$, con lo que el peso total del electrodo receptor será igual:

$$P = 42.6 \text{ Kg}$$

3.6.2.- Capacidad y carga

En una aproximación a las condiciones reales, puede considerarse que el electrodo receptor de cargas es una esfera de radio equivalente, capaz de generar una superficie igual a la superficie capaz de almacenar carga, el error que se comete no es apreciable ya que la configuración del campo eléctrico no tiene una variación notable.

$$\text{Para: } A = 9.95 \text{ m}^2$$

$$R_{eq} = 88.98 \text{ cm}$$

$$s = 320,68$$

$$S_{eq} = 298.03 \text{ cm}$$

Se ha desarrollado una fórmula para el cálculo de la capacitancia, la cual viene dada en el segundo capítulo (2.13) despreciando los términos a partir del cuarto se tiene :

$$C = 4\pi\epsilon_0 R_{eq} \left(1 + m + \frac{m^2}{1 - m^2} + \frac{m^3}{1 - 2m^2} \right) \quad 3.21$$

Siendo:

$$m = \frac{R_{eq}}{2(S_{eq} + R_{eq})} \quad 3.22$$

$$m = 0.115$$

Luego :

$$C = 111.69 \text{ pF}$$

Roth, analiza el mismo caso, esferas simétricas con respecto a tierra y deduce la fórmula siguiente:

$$C_0 = \frac{2 \text{ Seq.10}}{36(-1)} \quad 3.23$$

En donde:

$$\eta = \frac{1}{2} (z + 1) + \frac{1}{z + 2} + \frac{z}{2(z + 2)^3} + \frac{z}{2(z + 2)^4} +$$
$$- \frac{z}{(z + 2)^7} - \frac{z}{(z + 2)^8} \quad 3.24$$

Siendo:

$$z = \frac{2 \text{ Seq}}{R} \quad 3.25$$

Por condiciones de simetría, la capacitancia entre esfera y plano será igual a $2C_0$.

En el presente problema:

$$z = 6.699$$

$$\eta = 3.97$$

$$C = 111.49 \text{ pF}$$

Un valor promedio:

$$C_{\text{prom}} = 111.59 \text{ pF}$$

La carga máxima acumulada:

$$Q = C.V \quad 3.26$$

$$Q = 111.59 \text{ uC}$$

Energía acumulada en el capacitor:

$$W = 0.5 Q.V = 0.5 C.V \quad 3.27$$

$$W = 55.8 \text{ J}$$

Fuerza de atracción desarrollada entre electrodos:

$$F = \frac{Q^2}{16\pi \epsilon_0 (S_{eq} + R_{eq})^2} \quad 3.28$$

$$F = 2 \text{ kg}$$

RESUMEN DE LAS MAGNITUDES ELECTRICAS Y GEOMETRICAS DEL DISEÑO:

Voltaje de funcionamiento (V)	1 MV
Intensidad de campo máxima (E)	18.13 kV/cm
Capacitancia (C).....	111.59 pF
Carga acumulada máxima	111.59 uC
Energía acumulada máx.	55.8 J
Fuerza electrostática desarrollada	2 Kg
Coeficiente de seguridad	1.18
Radio de la esfera hueca(R).....	87 cm
Radio del anillo-cilíndrico(rl).....	15 cm
Distancia de aislamiento(s)	320.68 cm
Area aprovechable del electrodo	9.95 m ²
Material del electrodo receptor ...	Aluminio
Espesor de la lámina1/16 pulg
Peso del electrodo (Aprox.)	43 Kg

C A P I T U L O I V

DISEÑO DE ELEMENTOS DINAMICOS Y COMPLEMENTARIOS

MONTAJE Y PRESUPUESTO

4.1.- Banda transportadora de cargas

El proceso de carga continuo, se lleva a cabo mediante una banda sin fin, la cual debe tener las siguientes características:

- a) Buen aislante y presentar una resistencia superficial grande, capaz de retener carga eléctrica depositada en su superficie, sin que exista la tendencia a la distribución.
- b) Material fuerte y elástico; fuerte para ser capaz de transmitir movimiento y potencia en la forma de banda sin fin, sujeta a tensiones y esfuerzos necesarios para un funcionamiento adecuado; elástico, de manera que la fuerza desarrollada no deforme sino temporalmente su forma, solo en el momento de su aplicación, la fuerza de arrastre de las poleas, será función de la fuerza que desarrolle la banda para restituir su longitud inicial.
- c) Presentar una contextura uniforme, en especial en su superficie, presentando ésta, un acabado pulido, sin deformaciones o protuberancias que harían de la densi-

dad de carga superficial una variable, además de presentar puntos de acumulación de cargas, siendo crítico dentro del campo eléctrico formado.

4.1.1.- Materiales

Existe una gama de productos, que en más o menos proporción cumplen con las características, existen de origen orgánico, como el caucho tratado y sintéticos a base de plástico o Silicio (Caucho de silicona). Dentro de los elastómeros este producto posee la elasticidad del caucho en una zona de temperatura que va desde -50°C a $+250^{\circ}\text{C}$, aunque su resistencia a la tracción es menor.

El caucho natural y artificial cuya característica reside en su condición elástica, como material aislante, experimenta un tratamiento térmico con la adición de alguna sustancia especial (azufre, etc.) que transforma la masa plástica (de caucho natural por ejemplo), en elástica (caucho vulcanizado). El material aislante que se utiliza en la electrotecnia, contiene junto a los elastómeros y al azufre necesario para la vulcanización, sustancias de relleno, reblandecedores acelerador de vulcanización, antioxidantes, etc. (L1)

La tabla 4.1, muestra las propiedades de los principales elastómeros con las citadas sustancias vulcanizantes. Variando las proporciones de la mezcla, pueden alterarse ciertas características del material. Las características registradas en la tabla, corresponden a una dosificación normal de los productos agregados al elastómero. La dureza varía entre 50 y

80 IRH, grado internacional de dureza para el caucho; la escala está elegida de modo que el valor cero corresponde a un material con módulo de elasticidad cero, y el valor 100 al de un material con módulo de elasticidad infinito.

4.1.2.- Experimentación

Solamente la experimentación puede asegurar las propiedades de un material; sobre un generador electrostático de banda proporcionado por el Laboratorio de Física de la E.P.N. - Quito, de las características abajo anotadas, conectado según el diagrama de la Fig.4.1, se han obtenido los resultados tabulados en la Tabla 4.2.

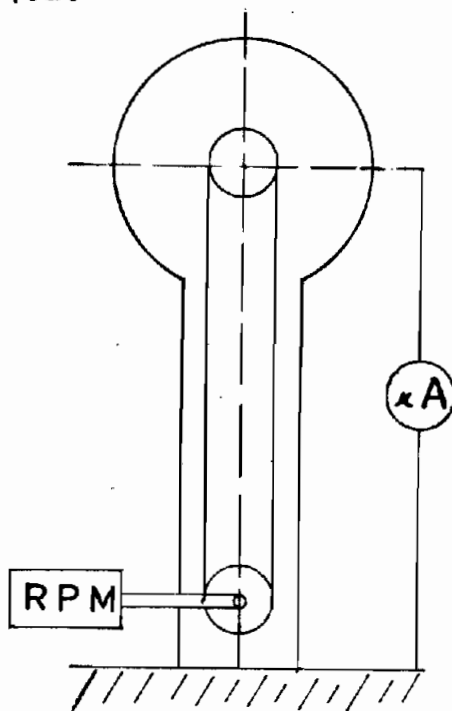


Fig. 4.1.- Diagrama del generador de prueba

Características del generador de prueba:

Radio de electrodo receptor 28 cm

Tabla 4.1 .- Materiales aislantes, Elastómeros. Elastómero	Peso específico g/cm	Propiedades Eléctricas				Propiedades mecánicas	
		Rigidez dieléctrica ca kV/mm	Resistividad Ohmio-cm	Factor de pérdi- das tg δ , 50 V 10 Hz	Resistencia a la Tracción kg/cm	Alargamiento de ruptura %	
Caucho natural (crepe, ahuma- do)	1.4 ... 1.8	25 ... 35	10 ... 10	0.02 - 0.08	100 - 200	380 - 500	
Butadieno-estirolo (GR - 5, Buna s)	1.4 ... 1.8	25 ... 35	10 ... 10	0.02 - 0.08	70 - 140	380 - 500	
Butadieno-acrilnitrilo (GR-A Perbunan)	1.3 ... 1.6	16 ... 20	10 ... 10	0.2 - 0.5	70 - 140	500	
Polisobutileno-isopren (GR-I, cauchobutilo)	1.4 ... 1.7	30 ... 35	10 ... 10	0.02 - 0.03	70 - 140	500	
Caucho de silicona (Silastic, Rhodorsil)	1.3 ... 1.5	16 ... 20	10 ... 10	0.02 - 0.08	40 - 100	200 - 400	
Poliutileno clorosulfonado (Hypalon)	1.7 ... 1.8	25 ... 30	10 ... 10	0.03	200	200 - 400	
Policloropren (GR-M, Neopren)	1.5 ... 1.7	25 ... 30	10 ... 10	0.04 - 0.06	70 - 140	500	

Longitud total de la banda	119 cm
Ancho de la banda	7 cm
Radio de las poleas	1.1 cm
Espesor de la banda	1 mm
Material de la banda	Caucho encarnado(vulc)
Voltaje de catálogo	250 kV

Tabla 4.2.- Resultados de las pruebas realizadas en el generador del Lab. de Física de la E.P.N.-Quito

n (RPM)	v(cm/seg)	I(μA)	(Coul/cm)
4840	557	7.2	$1.85 \cdot 10^{-9}$
4940	569	7.8	1.96 "
5000	576	8.3	2.05 "
5520	636	9.0	2.02 "
6090	693	10.3	2.29 "
6310	726	11	2.16 "

$$\sigma_{\text{prom}} = 2.05 \cdot 10^{-9} \text{ Coul/cm}^2$$

Se nota que existe un límite de densidad de carga, siendo función de la velocidad, hasta cierto valor, superado el mismo la densidad comienza a disminuir o a mantenerse constante

Considerando esta experiencia, puede lograrse la confección de una banda de características idénticas, tomándose en el presente estudio como parámetro el valor típico de densidad de carga superficial.

$$\sigma = 20 \cdot 10^{-9} \text{ Coul/cm}^2$$

4.1.3.- Funcionamiento mecánico

Para escoger una velocidad adecuada de la banda transportadora, deberá tomarse en cuenta, la solidez de la estructura vertical, encargada de sostener las poleas y sufrir por lo tanto los esfuerzos desarrollados por el transporte de energía. Debe evitarse en lo posible las vibraciones, es por ésto que una optimización del diseño puede realizarse después de las pruebas realizadas sobre el modelo.

Sin cambiar las características electrostáticas generales, la estructura puede ser reforzada, para un funcionamiento normal, en un rango de velocidad de las poleas, ideal de 1200 RPM.

El radio de las poleas es función de la velocidad lineal de la banda y un criterio de escogitamiento, en el presente diseño, es el acercamiento a los valores típicos, señalados en el primer capítulo

Con este criterio se ha escogido, los siguientes parámetros que determinarán un funcionamiento normal del aparato:

$$n = 1200 \text{ RPM}$$

$$v = 1885 \text{ cm/seg}$$

$$r = 15 \text{ cm} \quad (\text{Radio de las poleas})$$

El ancho de la banda, calculada con los valores anteriormente señalados, tiene la dimensión:

$$b = 30 \text{ cm}$$

Lo que da un valor de corriente igual a:

$$I = 113 \text{ uA}$$

El espesor de la banda, dependerá del esfuerzo a la tracción a la que va a estar sometida la banda.

La potencia de transferencia de carga positiva desde el punto de alimentación, hasta el electrodo receptor y cargas negativas desde éste al electrodo de tierra, viene dada por la relación:

$$P = 2 V.I \quad 4.1$$

$$P = 226 \text{ w}$$

El factor dos, incluido en la fórmula, se debe al doble trabajo de transferencia de carga que realiza la banda (L9)

Este trabajo de transferencia se sumará al necesario para vencer la inercia de las poleas, función de la masa de las mismas, rozamiento entre la banda y el material de las poleas, y rozamiento de los cojinetes, con estas consideraciones se ha determinado las características siguientes de funcionamiento mecánico de la banda:

Espesor de la banda	3 mm
Tensión de la banda	10 kg
Esfuerzo a la tracción	1.1 kg/cm
Alargamiento (%)	10%
Longitud inicial de la banda	369 cm
Longitud final de la banda	410 cm
Area sujeta a tracción	9 cm ²
Area de contacto	0.283 m ²

Los valores indicados, estarán sujetos a optimización ya que no se ha realizado ninguna experimentación , ni prueba, además de la falta de información sobre este tópico.

4.1.4.- Funcionamiento eléctrico

Como consecuencia de la circulación de carga, existe una fuerza magnética de repulsión que vendrá dada por la relación

$$F = \frac{\mu_0}{4 \pi} L \frac{2 I^2}{d} \quad 4.2$$

Siendo:

μ_0 = Premeabilidad magnética del vacío

$\mu_0 = 12.57 \cdot 10^{-7}$ Wb/A.m ; L = Longitud de la banda

Esta fuerza en realidad es despreciable, comparándola con la tensión de la banda.

Sobre la superficie de la banda aislante existe una intensidad de campo tangencial (E_t), que depende de la resistencia de aislamiento superficial, característica del material y de la tensión a lo largo de la banda.

$$V = E_t \cdot L \quad 4.3$$

Con los datos anteriores:

$$E_t = 2.45 \text{ kV/cm}$$

Valor aproximado al típico, señalado en el primer capítulo ($E_t = 3 \text{ kV/cm}$)

La potencia de transferencia de carga positiva es igual:

$$P = V \cdot I = E_t \cdot L \cdot \sigma \cdot v \cdot b$$

$$P = 113 \text{ w}$$

Por unidad de superficie:

$$P' = 0.0924 \text{ w/cm}^2$$

4.2.- Poleas, ejes y rodamientos

4.2.1.- Poleas

La potencia transferida en forma de carga eléctrica, es pequeña, la solidéz de las poleas encargadas de transferir el movimiento es función de la tensión necesaria de la banda para arrastrar la polea.

La polea superior gira alrededor de un eje, el cual solo sirve de apoyo, en virtud de rodamientos que están instalados en la misma polea, las dimensiones y diseño viene dado en el Apéndice correspondiente a planos.

La polea inferior gira con el eje que trasmite el movimiento desde el motor y en este caso son los rodamientos los apoyos, los cuales están instalados en los soportes aislantes, el diseño y dimensiones vienen especificadas en el Apéndice de planos.

Es de importancia que el material escogido para la construcción de las poleas sea a la vez sólido y liviano; sólido por el trabajo al que va a estar sujeto y liviano para limitar los esfuerzos sobre los soportes aislantes.

Además de estas características, es indispensable que también sea un material aislante, de manera que las cargas transportadas no se distribuyan sobre su superficie sino que sean transferidas al electrodo receptor de carga.

El material escogido en el presente diseño para este elemento, es la madera tratada, material que puede ser trabajado con facilidad y puede tomar la forma de diseño, sin perder sus cualidades mecánicas.

Un tratamiento eficiente para aumentar su resistencia de aislamiento, se lo hace en base a secado y barnizado en forma de chapeado duro, proceso a base de resinas fenólicas que se vuelven extraordinariamente compactas mediante la aplicación simultanea de presión y calor.

La madera más usada como aislante, es la madera de haya y cuyas características vienen especificadas en la Tabla 4.3.- Una investigación en este campo puede proporcionar una gama de maderas con características y calidades superiores, mejorando la seguridad y eficiencia del equipo.

Tabla 4.3.- Propiedades de la madera impregnada

Propiedades	Impregnación	
	Aceite linaza	Aceite mineral
Peso específico a 20°C (g/cm ³)	0.93	0.88
Resistencia a la compresión paralela a las fibras (g/cm ²)	800	800
Rigidéz dieléctrica, bajo aceite perpendicular a las fibras (kV/cm)	16 - 18	16 - 18
Constante dieléctrica relativa	3.3	3.3
Constante de pérdidas, tg δ		0.29
Resistencia a la temperatura, cont.	115°	115°

El peso de las poleas es función de peso específico, con un promedio de 0.9 g/cm³, se tiene un peso aproximado de 22 kg; dando un tratamiento a maderas más livianas puede lo

grarse una disminución notable, así por ejemplo se puede experimentar con madera de balsa tratada, secada a presión, barnizada o bañada con una resina epóxida que adquiriera suficiente dureza después del secado; un peso ideal de las poleas puede ser 10 kg.

4.2.2.- Ejes

El eje superior, como se explicado anteriormente, sirve de apoyo a la polea, sin embargo está sujeto a esfuerzos de compresión y fuerzas de flexión, como se indica en la Fig. 4.2.



Fig. 4.2.- Fatiga de un eje sometido a momentos de flexión provocados por fuerzas interiores y exteriores.

El peso Q queda fijado por la construcción de la polea y la magnitud F_t puede ser una magnitud muy variable según el sistema de accionamiento o de trabajo que realice.

El eje inferior además de estas sollicitaciones va a estar sujeto a un momento flector, el cual debe mantenerse en límites razonables, de ahí que el diámetro de la polea no debe ser inferior al valor límite determinado por la potencia del motor, por otra parte el emplazamiento y el cojinete más

próximo no debe ser superior a la mitad de la longitud desde el extremo del eje.

Al escoger como diametro del eje $d_e = 1$ pulg., el sobredimensionamiento es exesivo, ya que la potencia total desarrollada no excede a los 2 kw , siendo para este caso suficiente un eje de 20 mm de diámetro, con esto se ha querido dar una seguridad más de funcionamiento. (L10)

Las dimensiones de los ejes estan especificados en los planos.

El diseño de esta parte mecánica, está sujeta a optimización mediante sugerencias o exigencias propias del campo mecánico.

Entre el motor y la máquina de trabajo, existe un organo mecánico de transmisión. Las dimensiones de los órganos de transmisión deben estar correctamente dimensionados, los cuales dependen del par máximo que deben transmitir y se calcula por la fórmula:

$$M = \frac{P \cdot 975}{n} \quad 4.4$$

Siendo:

P = Potencia

n = Velocidad (RPM)

Como los demás órganos de transmisión, los platos de acoplamiento deben ir asentados sobre el eje. Para el ajuste a efectuar es conveniente regirse por las indicaciones de las normas DIN 42943. (L10)

El acople de ambas máquinas suele efectuarse interponien-

do entre los dos platos piezas elásticas de cuero o de caucho, que amortiguen las sacudidas en el instante del arranque y durante el servicio. Es necesario que el centrado de estos discos sea muy preciso, con el objeto de que las pequeñas excentricidades no determinen esfuerzos de fatiga que provoquen desgaste rápido.

Los cojinetes presentarán el mínimo rozamiento, por lo que se ha escogido, los denominados cojinetes antifricción de bolas, los cuales tendrán las siguientes características:

Clase 0.3

Coefficiente de rozamiento	0.0015
Diámetro interior	25 mm
Diámetro exterior	62 mm
Profundidad	17 mm

Para colocar estos anillos basta calentarlos en aceite a 90°C e introducirlos rápidamente en los ejes.

4.3.- Soportes aislantes

Todos los elementos que hasta este punto se han especificado están instalados en una estructura de material aislante, formada por dos cilindros montados sobre una base móvil.

La característica principal, a más de buen aislante, es la resistencia mecánica que debe presentar ante la presencia de esfuerzos mecánicos y eléctricos, traducidos en una fuerza de presión.

De carácter mecánico son los pesos de los diferentes elementos del diseño, además de las fuerzas producidas por la transmisión de movimiento y de energía; de carácter eléctrico es la presencia de un fuerte campo electrostático.

El análisis de las tensiones sobre la polea en el arranque y en funcionamiento normal, puede ser deducido mediante el gráfico de la Fig. 4.3.

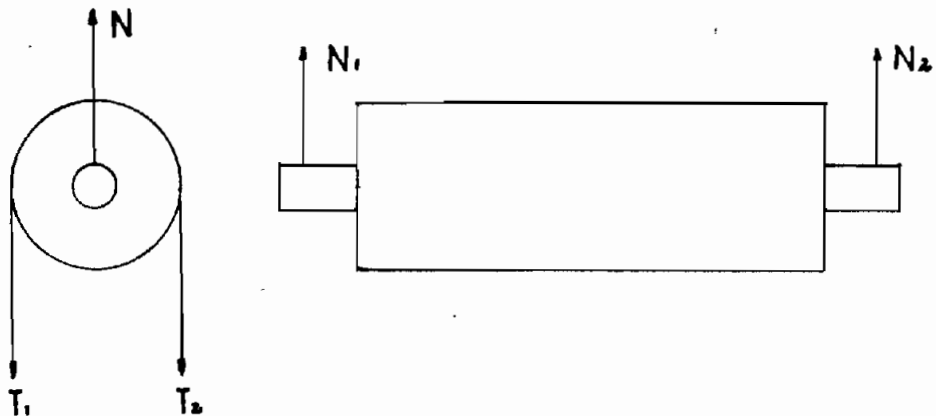


Fig. 4.3.- Análisis de las tensiones en la polea

Vienen dadas por las relaciones:

$$T_1 = \frac{T_0}{\mu + 1} - \frac{I \alpha}{r} \quad 4.5$$

$$T_2 = \frac{T_0}{\mu + 1} + \frac{I \alpha}{r} \quad 4.6$$

Siendo:

T_0 = Tensión de la polea en estado estático

μ = Coeficiente de rozamiento estático entre las superficies (Aprox. 0.25)

I = Momento de inercia de las poleas

r = Radio de las poleas

La fuerza que actúa sobre el eje y por ende en los soportes aislantes, es la suma de las dos tensiones, dividida en los dos apoyos, esta fuerza tiene un valor aproximado de :

$$F = 12.5 \text{ kg}$$

Considerando esta última sollicitación, a la que va a es-

tar sujeta la estructura aislante, la fuerza total ejercida tiene un valor igual a 135 kg.

Un factor de seguridad de dos aplicado al diseño de la estructura, aseguraría un funcionamiento normal del aparato.

Dentro de los materiales aislantes que pueden ser utilizados para la construcción de los elementos de la estructura pueden citarse:

Madera tratada	620 kg/cm ²
Fibra de vidrio	3500 kg/cm ²
Cloruro de polivinilo duro	900 a 1000 kg/cm ²
Acrílico	600 kg/cm ²

Es posible conseguir en la industria nacional, tubos de materiales sintéticos, los cuales pueden ser reforzados mediante la inclusión de resina epoxi mezclada con arena de cuarzo, lo que da una seguridad en este campo de la construcción.

Los elementos señalados presentan valores de constante dieléctrica que fluctua entre 3.3 para la madera hasta 8 para la fibra de vidrio. (L1)

Para asegurar su estabilidad la estructura estará empernada a la base móvil, arreglo que se consigue con la adaptación de un anillo del mismo material soldado al cilindro aislante.

El espesor del cilindro vendrá determinado por la resistencia a la compresión que presente el material, considerándose el factor de seguridad señalado anteriormente.

4.4.- Ecualizadores de campo

Estos elementos superpuestos y aislados entre si, determinan una distribución de la tensión mejorada , como puede apreciarse del gráfico de la Fig. 4.4.

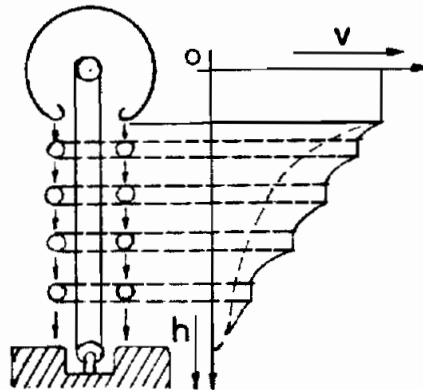


Fig. 4.4.- Control de la distribución de la tensión en un generador de cinta, por medio de a nillos de guarda

La corriente de efluvios que va de uno a otro electrodo, los mantiene a determinados potenciales, de lo cual resulta como puede verse, una distribución del voltaje a lo largo de todo el soporte, mucho más lineal que la que se produciría sin los anillos en cuestión y disminuye el peligro de chispas rampantes en las proximidades del electrodo de alta tensión. Para conseguir también una distribución lineal del voltaje a lo largo de la cinta transportadora, cada aro lleva unos travesaños paralelos entre los cuales circula la cinta. (11)

El diseño de los anillos viene dado con sus dimensiones ideales, en el apéndice correspondiente a planos.

El material escogido para la construcción, por ser un material liviano y buen conductor, es el aluminio, y pueden ser moldeados de tubos que se consigue en el mercado.

4.5.- Alimentación y transferencia de carga

La tensión de alimentación de cargas variará entre 10 y 20 kV, conseguidos mediante rectificación de Alta Tensión Alternada, cuyo circuito de generación y medida viene dado en la Fig. 4.5

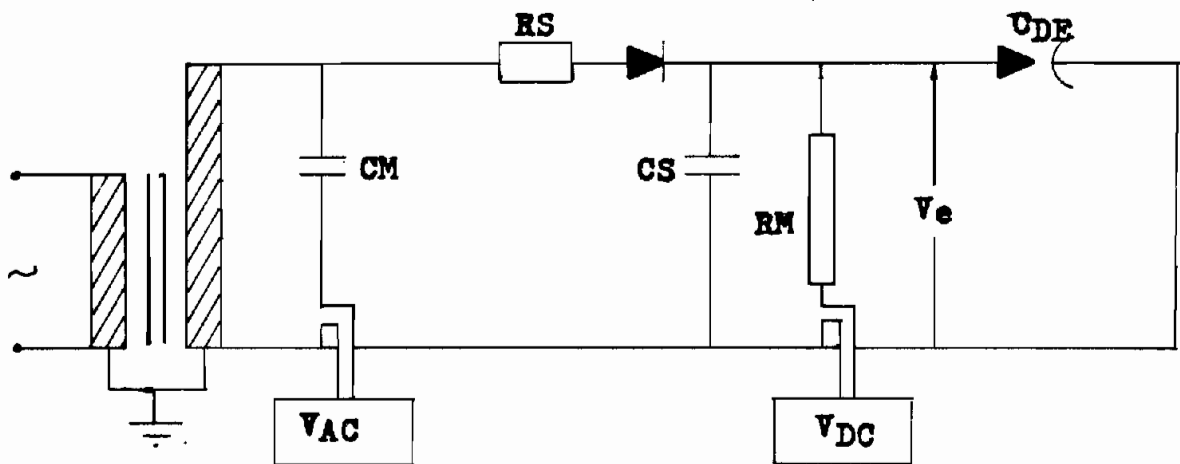


Fig.4.5.- Generación y medida de la tensión continua de alimentación

Las cargas producidas por el generador de alimentación serán transferidas a la banda mediante un peine de puntas salientes; con el fin de que la transferencia sea grande el alimentador de puntas tendrá un contraelectrodo plano, cuya capacitancia es función de la densidad de carga superficial y del ancho de la banda.

La carga transferida es:

$$Q = b \cdot \sigma = V_e \cdot C_{DE} \quad 4.7$$

De donde:

$$C_{DE} = \frac{b \cdot \sigma}{V_e} \quad 4.8$$

Luego, de los valores especificados:

$$C_{DE} = 30 \text{ uF}$$

Las dimensiones del capacitor, pueden ser mejoradas hasta conseguir este valor óptimo, mediante la experimentación en el modelo, ya que es muy complicado el calcular analíticamente la distribución de campo de un arreglo punta-plano.

El montaje de los elementos de alimentación viene dado en los planos y la construcción será de aluminio.

El proceso de cebado de carga al electrodo receptor viene explicado en el primer capítulo, en el diseño, se ha escogido un arreglo construido en aluminio, que forma un peine el cual producirá un campo fuerte debido a las puntas y se producirá la descarga por efecto corona, la distancia a la banda puede ser variada hasta conseguir un máximo flujo.

Sobre la base de montaje un arreglo similar recogerá las cargas de polaridad opuesta .

Los detalles de montaje y construcción vienen en el apéndice.

El material estructural para el arreglo de alimentación es aislante, pudiendo ser PVC, rígido.

4.6.- Especificaciones del motor

Con el fin de proporcionar un funcionamiento estable, sin que exista vibración por cambios en el voltaje de alimentación del motor ó un cambio de carga debida a la transferencia de potencia, se ha escogido para este diseño un motor de corriente continua, que proporciona una buena regulación de la velocidad en su conexión shunt, característica que puede encontrarse en la Fig. 4.7

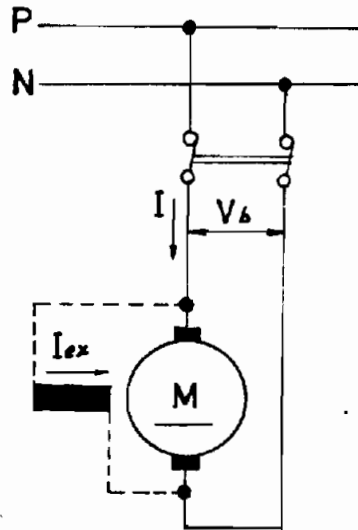


Fig.4.6.- Conexión de un motor shunt de corriente continua

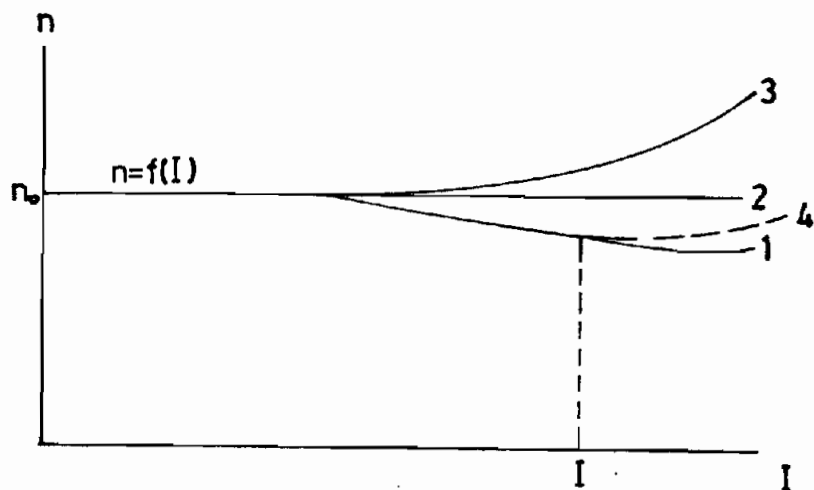


Fig.4.7.- Característica Velocidad-Corriente de carga de un motor shunt de corriente continua

El control de la velocidad, mediante un reóstato en el circuito de campo, es una forma sencilla para el escogimiento de velocidad dentro de una gran gama.

La potencia absorbida de la red por un motor de corriente continua vale:

$$P_a = V_b \cdot I \quad 4.9$$

y la potencia suministrada, es decir la potencia en el eje o en la polea vale:

$$P = E \cdot I \quad 4.10$$

ésta es por lo tanto la potencia mecánica.

Por otra parte, se tiene que:

$$P = K_l \cdot n \cdot \phi \quad 4.11$$

la potencia vale también:

$$P = K_l \cdot n \cdot \phi \cdot I \quad 4.12$$

La expresión del par motor es :

$$M = F \cdot r \quad 4.13$$

En el movimiento circular, la potencia o trabajo por segundo está expresado por:

$$P = F \frac{2 \cdot \Pi \cdot r \cdot n}{60} \quad 4.14$$

que se puede poner en la forma:

$$P = \frac{2 \cdot \Pi \cdot n}{60} \cdot M \quad 4.15 \quad (L11)$$

Siendo:

- Pa = Potencia de entrada
- Vb = Voltaje de alimentación
- E = Fuerza contraelectromotriz
- I = Corriente de carga
- ϕ = Flujo magnético
- F = Fuerza de arrastre
- r = radio de la polea
- n = Velocidad del motor en RPM

Si consideramos que se necesitan 10 kg de fuerza presentes por la tensión de la banda, la potencia que debe desarrollar el motor para vencer esta carga es de 1850 w, la cual debe sumarse a la potencia de transferencia de carga eléctrica, con lo que las características del motor serán:

- Potencia 2.8 HP
- Rango de velocidad 0 - 1500 RPM
- Voltaje de alimentación 110 V D.C.
- Rendimiento 80%
- Motor con brida de fijación
- Base única
- Reóstatos de campo para control de velocidad
- Reóstato de armadura para arranque

4.7.-Montaje

Los detalles del montaje, viene dado en el apéndice de planos, así como el orden de armado.

El vehículo sobre el cual está montado el equipo vendrá construido en hierro, con garruchas de 10 cm, para evitar vibración en el traslado.

4.8.- Materiales y presupuesto

Electrodo receptor

Material (planchas de aluminio de 1/16")S/.2000,00

Mano de Obra..... 3000,00

Elementos móviles ..

Banda de caucho 500,00

Poleas de madera tratada 500,00

Cojinetes de bolas 500,00

Ejes de acero 400,00

Motor de D.C. (3 HP) 7000,00

Acople elástico 1000,00

Estructura de soporte

Tubos de PVC 1000,00

Resina epoxi 1000,00

Arena de cuarzo 200,00

Pletina de refuerzo 200,00

Elementos de carga y ecualizadores

Tubo de aluminio de 1" de \emptyset 500,00

Tubo de aluminio de 4" de \emptyset 1500,00

Tubo de baquelita ó PVC rígido 1" \emptyset 800,00

Mano de obra 1000,00

Carro

Materiales 4000,00

Mano de obra 3000,00

Costo aproximado de construcción.....S/ 28.100,00

4.9.- Conclusiones

Se ha puesto mucho interés en el diseño de los elementos eléctricos del sistema, en el aspecto mecánico el diseño esta sujeto a exigencias que no están al alcance de este estudio, pueden ser incluidos en la construcción sin cambiar el principio de funcionamiento eléctrico.

El costo de construcción es también apreciativo, basado exclusivamente en datos verbales de información extraoficial.

Puede estar sujeto a reajuste, siendo en todo caso menor que el calculado.

El presente diseño está a consideración de las autoridades de la E.P.N., a fin de conseguir una aprobación para la construcción inmediata, pasando a formar parte de Laboratorio de Alta Tensión, en donde se planificará una ampliación y utilización dentro del campo de la investigación y pruebas de equipos.

La energía acumulada en el electrodo receptor es pequeña, por lo cual no se puede determinar el voltaje conseguido en la realidad, siendo de interés un estudio de un método de medición, estudio que puede ser considerado como complemento a la presente Tesis.

B I B L I O G R A F I A

- L1 Arnold Roth. Técnica de la Alta Tensión. (Hochspannungstechnik). Traducción de la cuarta edición alemana por Juan Corrales Martín. Editorial Labor S.A. 1966.
- L2 Cestmir Simane. Accelerators of Ions and Electrons. Constable & Co. Ltd. London.
- L3 Alfredo Mena. Técnica de la Alta Tensión. Apuntes de clase del año lectivo 1973-74.
- L4 Harnwell Gaylord P. Principios de electricidad y magnetismo. Selecciones Científicas - Madrid 1961
- L 5 E. Kuffel. High Voltage Engineering. Pergamon Press-Oxford 1950

- L6 Allen Nussbaum. Electromagnetic Theory for engineers and scientists. Prentice Hall Inc. N.Y. 1965
- L7 Herman A. Hauss. Case Studies in Electromagnetism Problems with Solution. John Wiley & Sons, Inc., N. Y. 1960
- L8 Haus von Beeren. La Escuela del Técnico Electricista. Tomo XII. Técnica de la Alta Tensión. Aditorial Labor S.A., 1949. Reimpresión.
- L9 Arnold Wagner. Máquinas eléctricas-Funcionamiento- Reparación y bobinado. Editorial Gustavo Gili, S.A. , Barcelona.
- L10 José Ramírez Vazquez.- Pilas y Acumuladores, máquinas de Corriente continua. Enciclopedia CEAC de Electricidad. Ediciones CEAC, S.A. Barcelona.1973.

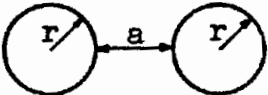
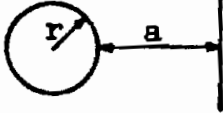
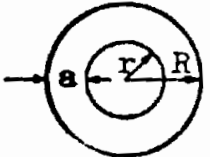
INTENSIDAD DE CAMPO DE DESCARGA DEL AIRE PARA ELECTRODOS PLANOS

En la siguiente tabla están los valores de cresta de la rigidez dieléctrica del aire en KV/cm para placas con perfil Rogowski, - en función de la distancia a en mm y para la densidad del aire $\delta = 1$ (según Ritz).

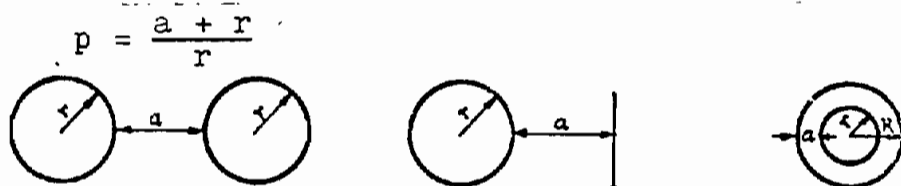
a	\hat{E}_d	a	\hat{E}_d	a	\hat{E}_d	a	\hat{E}_d
mm	kV/cm	mm	kV/cm	mm	kV/cm	mm	kV/cm
0,1	96	16	29,85	41	27,95	66	27,18
0,2	73,3	17	29,7	42	27,93	67	27,16
0,3	64,1	18	29,55	43	27,86	68	27,15
0,4	58,8	19	29,44	44	27,84	69	27,14
0,5	55,2	20	29,35	45	27,82	70	27,13
0,6	52,17	21	29,23	46	27,78	71	27,08
0,7	49,86	22	29,11	47	27,76	72	27,06
0,8	48,06	23	29,03	48	27,75	73	27,03
0,9	46,5	24	28,95	49	27,71	74	27,00
1,0	45,4	25	28,88	50	27,70	75	26,99
2,0	39,5	26	28,81	51	27,65	76	26,96
3,0	36,71	27	28,74	52	27,60	77	26,93
4,0	35,02	28	28,69	53	27,55	78	26,92
5,0	34,0	29	28,64	54	27,50	79	26,90
6,0	33,16	30	28,6	55	27,45	80	26,87
7,0	32,57	31	28,51	56	27,41	81	26,85
8,0	32,12	32	28,44	57	27,37	82	26,83
9,0	31,67	33	28,36	58	27,34	83	26,80
10,0	31,35	34	28,32	59	27,32	84	26,78
11	30,95	35	28,28	60	27,30	85	26,76
12	30,62	36	28,19	61	27,28	86	26,74
13	30,4	37	28,16	62	27,26	87	26,72
14	30,2	38	28,11	63	27,222	88	26,70
15	30,02	39	28,08	64	27,219	89	26,69
		40	28,0	65	27,20	90	26,66

En la siguiente tabla están los factores de utilización según Schwaiger para las principales disposiciones de esferas, en función de p , donde:

$$p = \frac{a + r}{r}$$

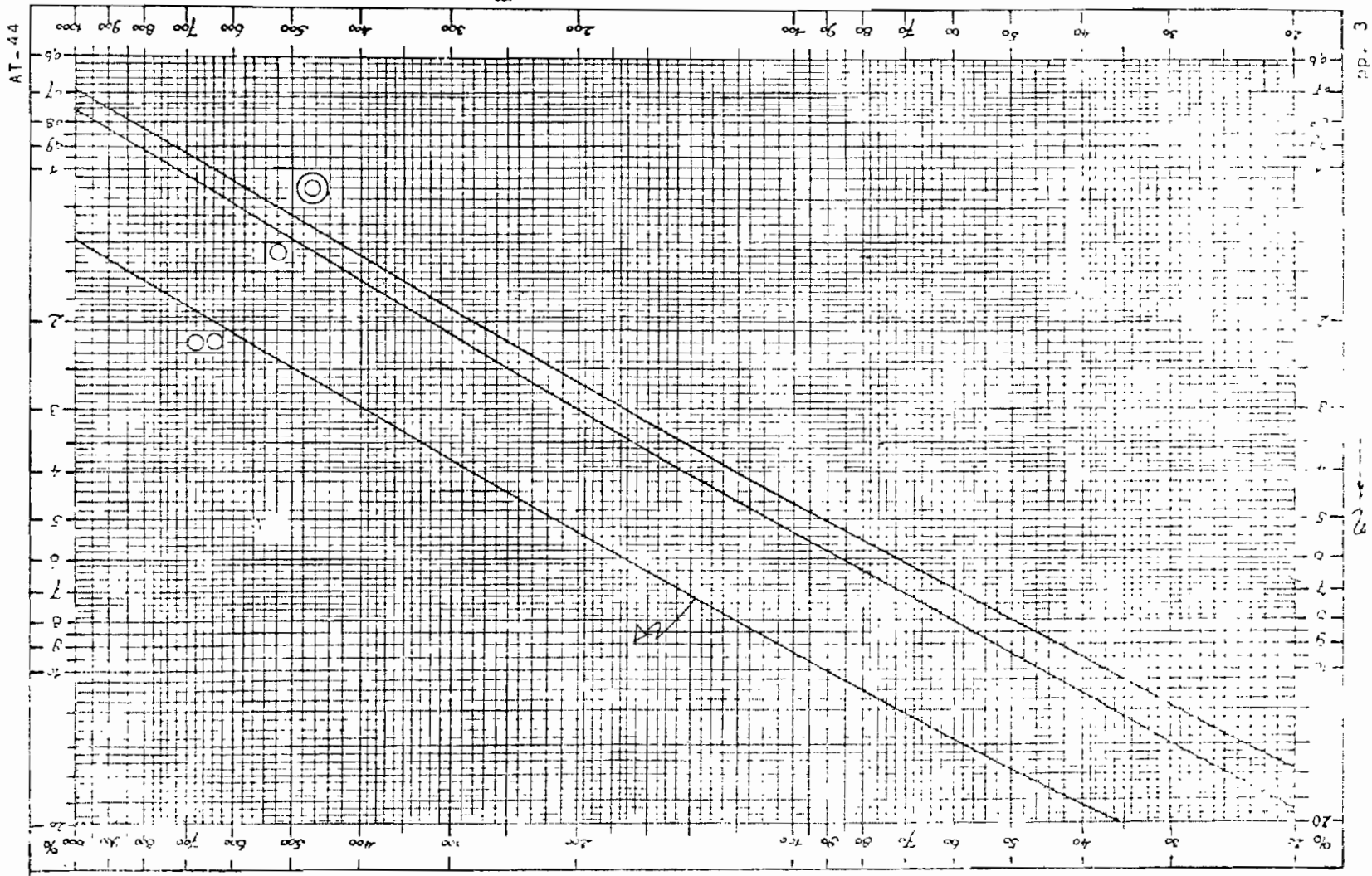
p				
	Distribución simétrica de la tensión	Un polo puesto a tierra.		
1	100,0 %	100,0 %	100,0 %	100,0 %
1,5	85,0 %	83,4 %	73,2 %	66,7 %
2	73,2 %	66,0 %	56,3 %	50,0 %
3	56,3 %	42,8 %	37,2 %	33,3 %
4	44,9 %	30,8 %	27,6 %	25,0 %
5	37,2 %	23,8 %	21,8 %	20,0 %
6	31,8 %	19,3 %	17,8 %	16,7 %
7	27,6 %	16,3 %	15,2 %	14,3 %
8	24,4 %	14,0 %	13,3 %	12,5 %
9	21,8 %	12,3 %	11,7 %	11,1 %
10	19,7 %	11,0 %	10,5 %	10,0 %
15	13,3 %			
20	10,0 %			

En la siguiente tabla están los factores de utilización según Schwaiger, para las principales disposiciones cilíndricas, en función de p donde:



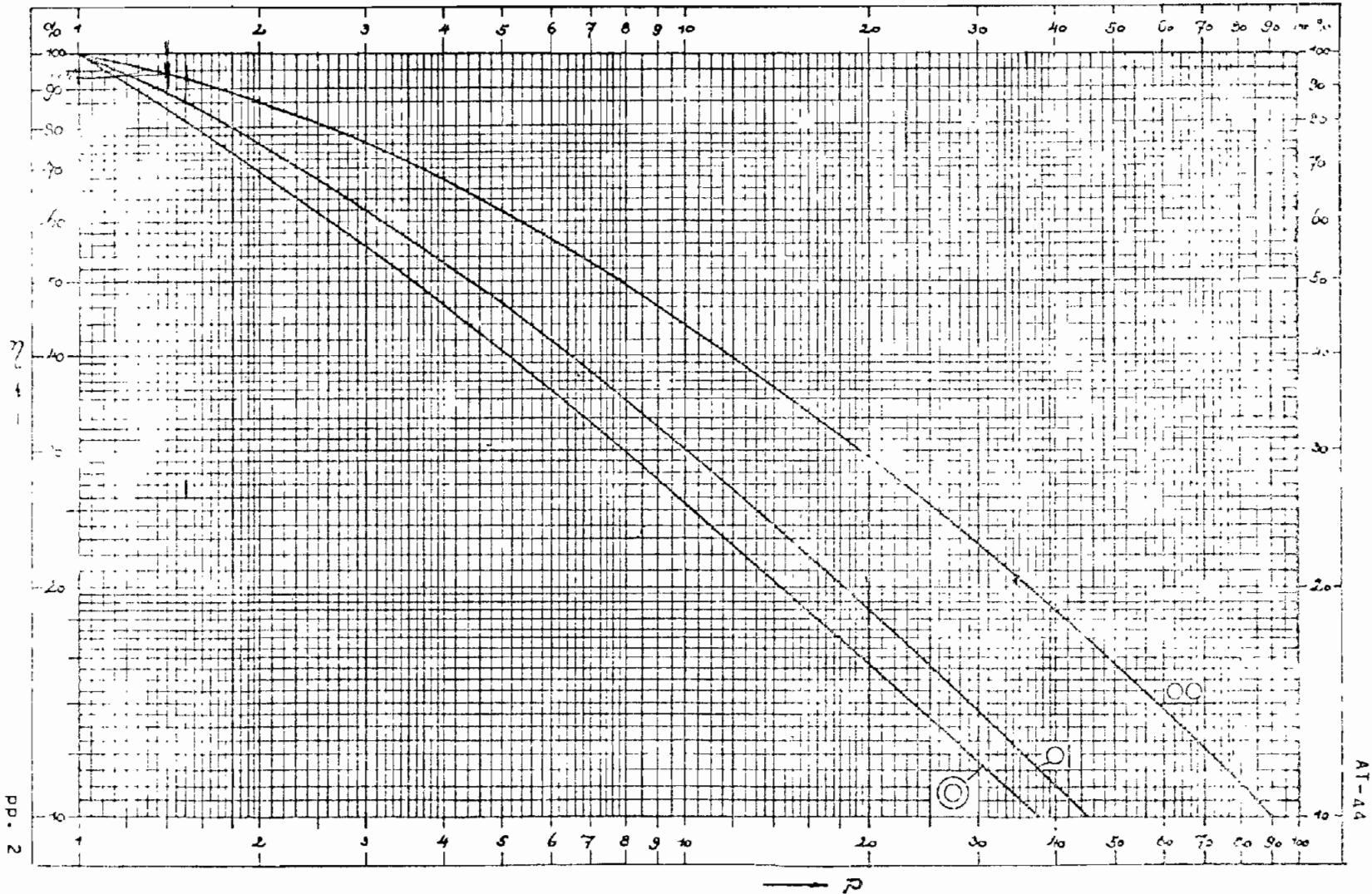
	Disposición	Disposición	Disposición
p			
1	100 %	100 %	100 %
1,5	92,4	86,1	81,1
2	86,1	76,0	69,3
3	76,0	62,3	54,9
4	68,4	53,3	46,2
5	62,3	46,8	40,2
6	57,4	41,9	35,8
7	53,3	38,0	32,4
8	49,7	34,9	29,7
9	46,8	32,3	27,5
10	44,2	30,1	25,6
15	34,9	22,8	19,3
20	29,1	18,6	15,8
30	22,9	13,7	11,7
40	18,55	11,2	9,5
50	15,74	9,32	7,98
70	12,2	7,06	6,2
100	9,4	5,37	4,7
200	5,4	3,0	2,7
300	3,8	2,14	1,9
400	3,0	1,68	1,5
500	2,5	1,38	1,25
600	2,14	1,182	1,07
700	1,88	1,034	0,94
800	1,68	0,922	0,84
900	1,52	0,832	0,76
1000	1,38	0,76	0,69

FACTOR DE UTILIZACION SEGUN SCHWAIGER, PARA CILINDROS

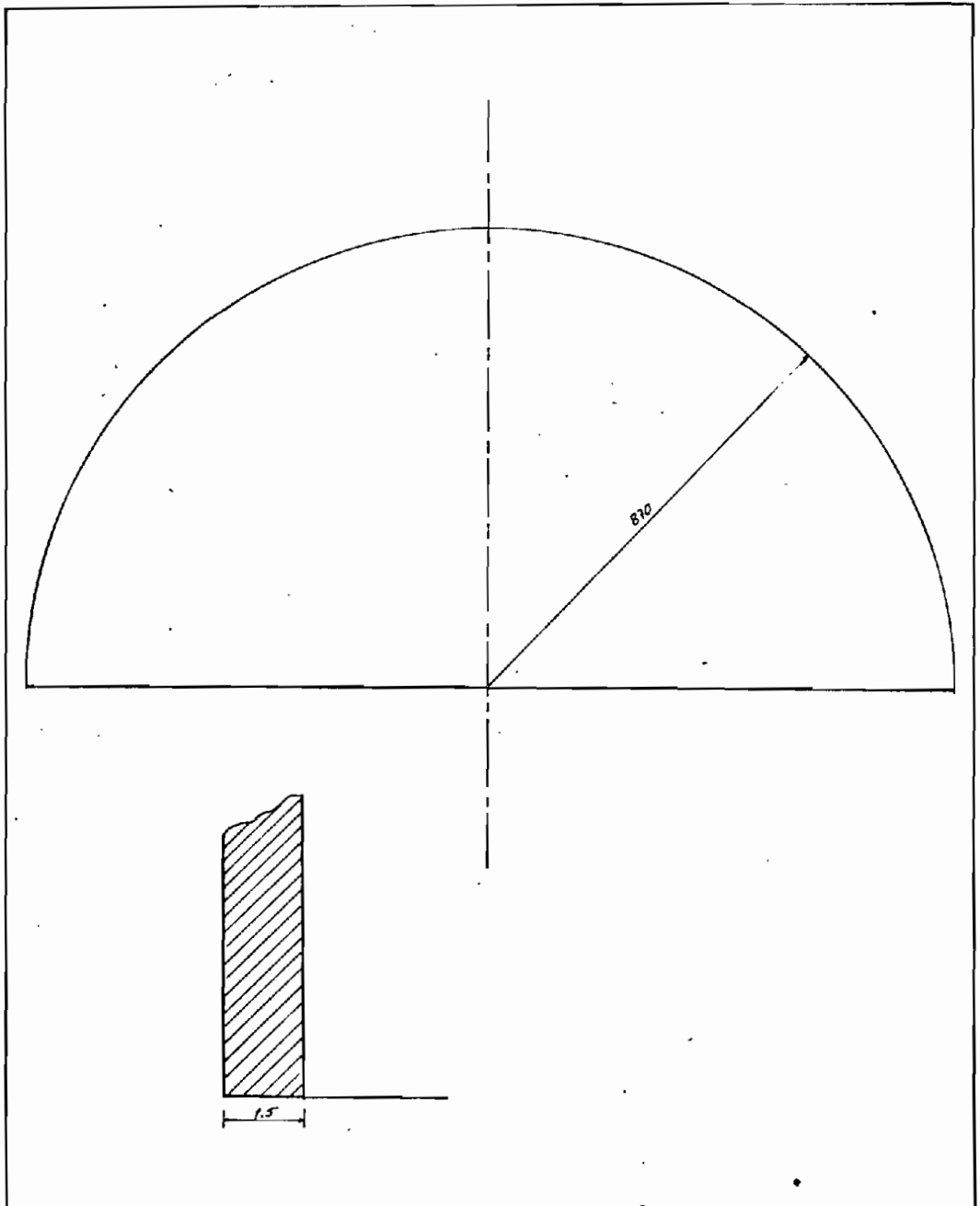


AT-44

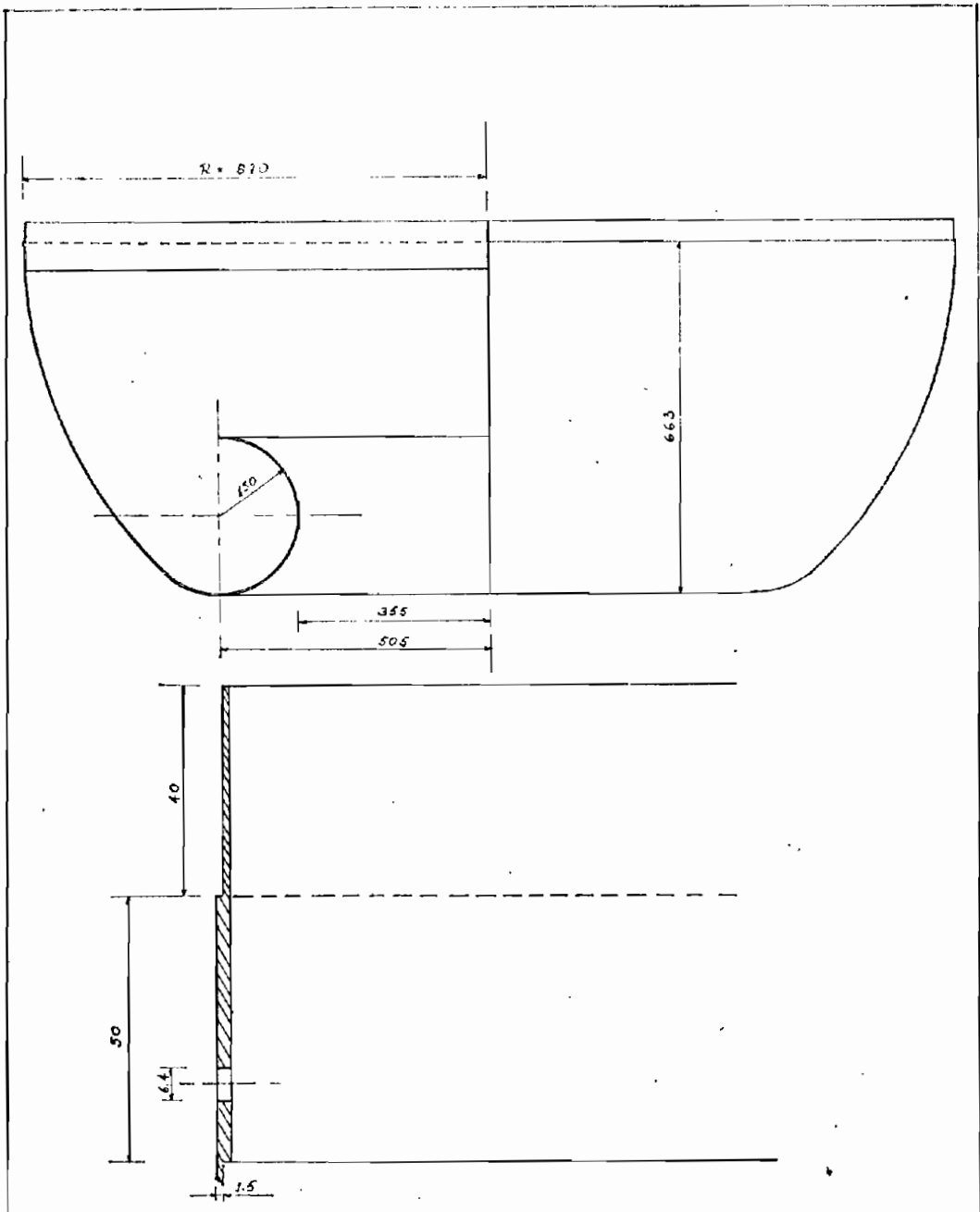
Fig. 3



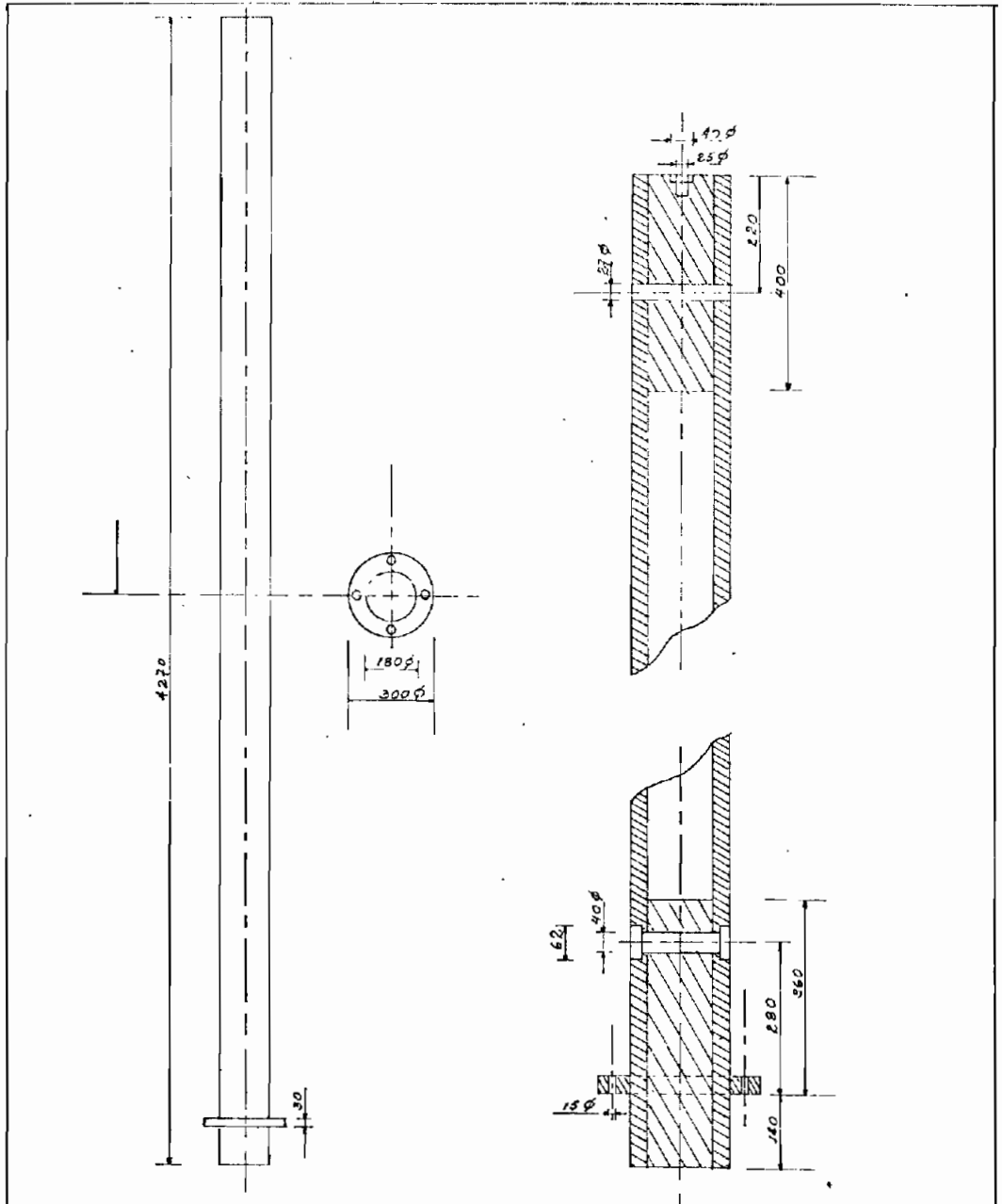
FACTOR DE UTILIZACION SEGUN SCHWAIGER, PARA CILINDROS



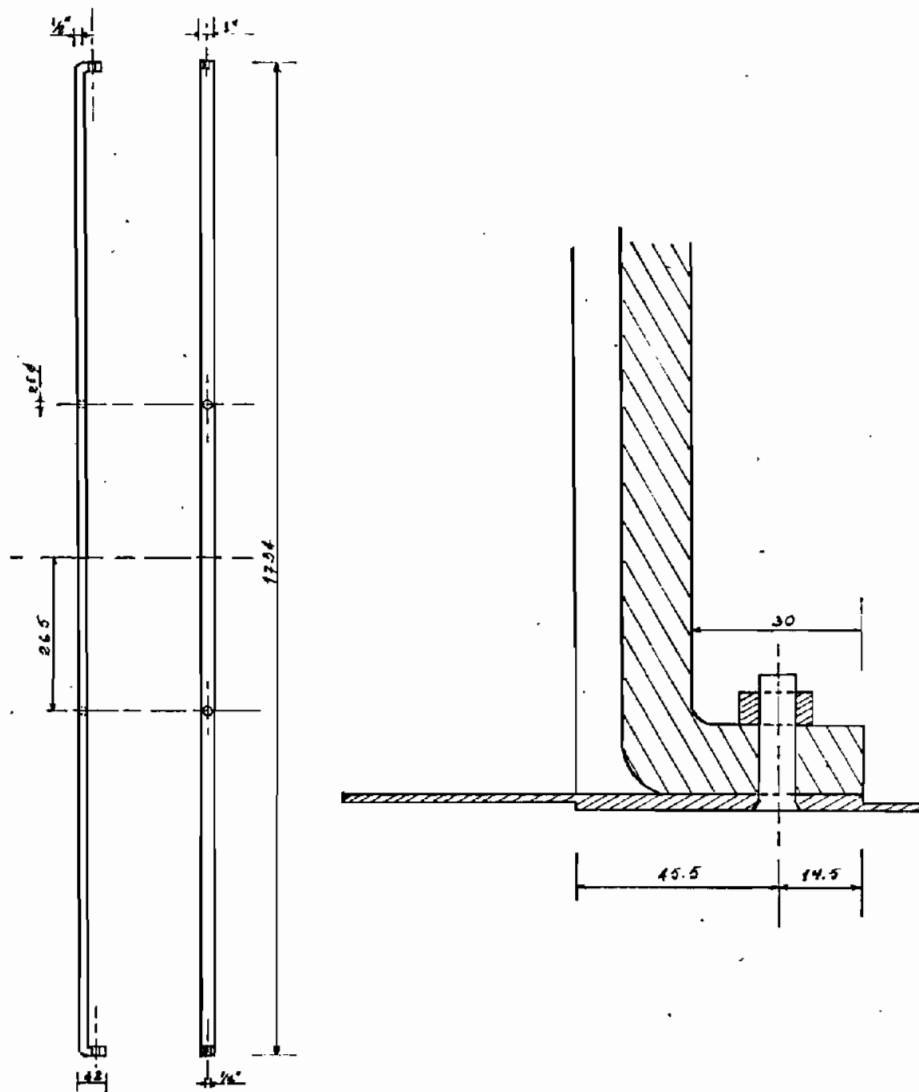
N	NOMBRE	Generador Electrostático	MATERIAL: AL.
OBSERVACIONES			NORMA
NOTA: Detalle de remate inferior			NUMERO
			LAMINA
			Dibujado por
			M. Barba
			Fecha
			23-XI-75
ESCALA: 1:10	SEMIESFERA SUPERIOR		Aprobado por
CODIGO	DE ELECTRODO RECEPTOR		Visto bueno por
			Fecha
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			FAC. ING. ELECTRICA
			DEPARTAMENTO



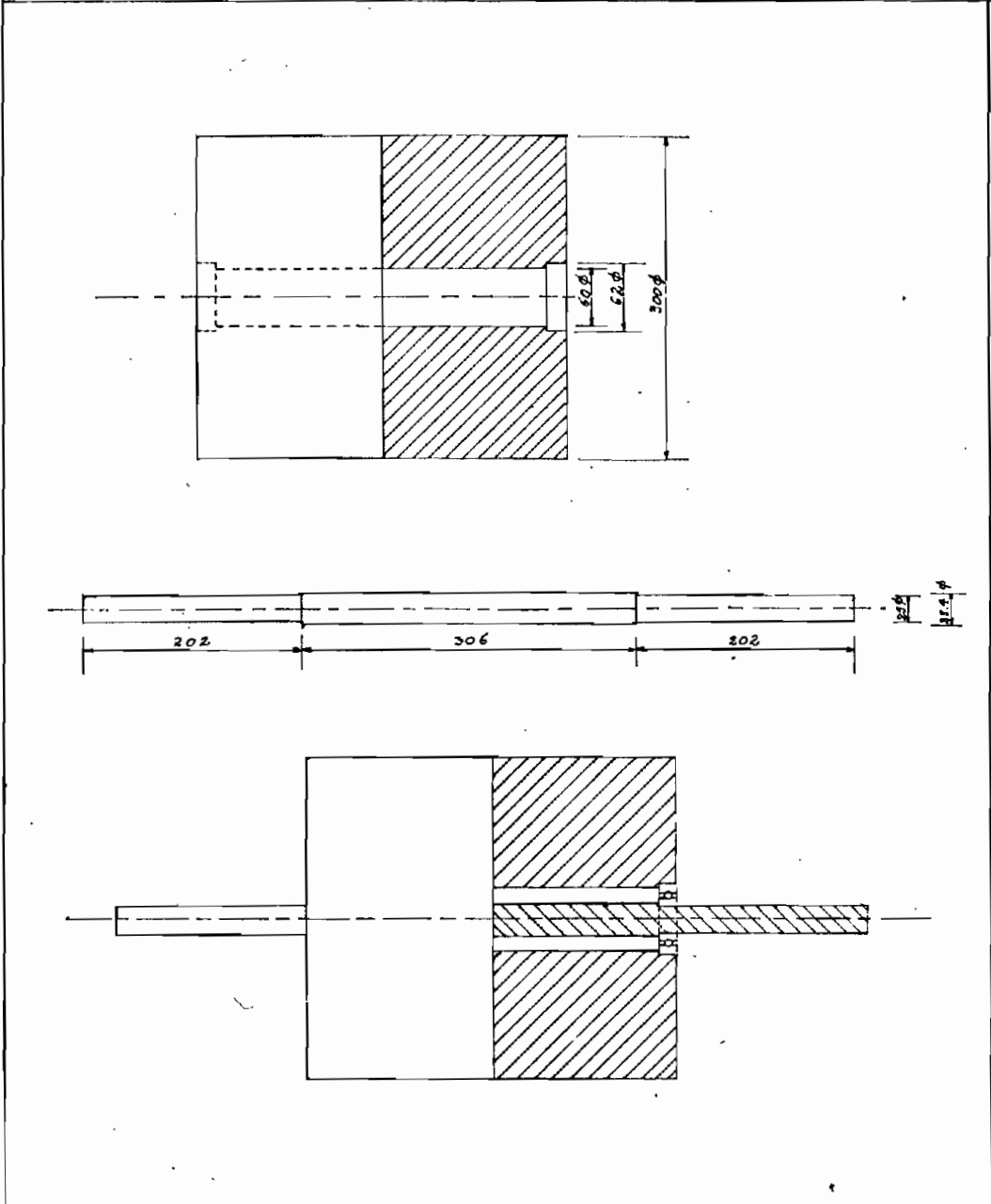
N	NOMBRE	Generador Electrostatico	MATERIAL:	Al.
OBSERVACIONES			NORMA	
NOTA: Detalle de remate superior			NUMERO:	LAMINA
			Dibujado por	Fecha
			M. Barba	25.11.73
			Aprobado por	Fecha
ESCALA	1:10 1:1	SEMIESFERA INFERIOR	Visto bueno por	Fecha
CODIGO		DE ELECTRODO RECEPTOR		
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			FAC. ING. ELECTRICA DEPARTAMENTO	



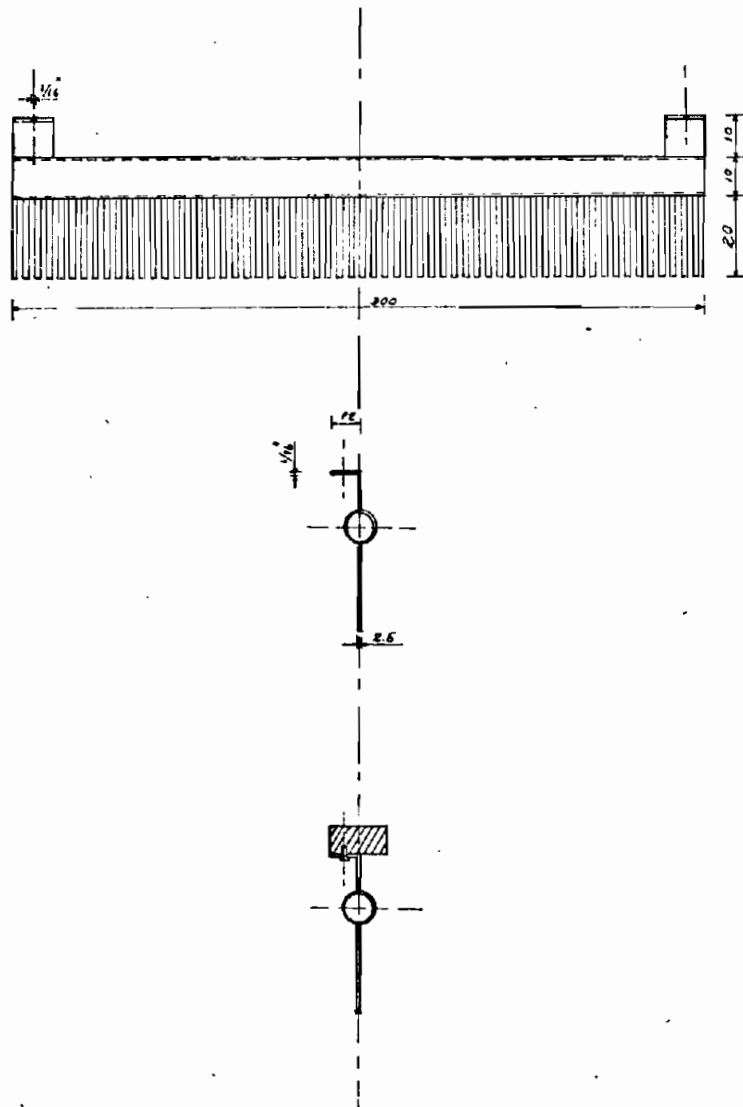
N	NOMBRE	Generador Electrostático	MATERIAL : PVC + Res.	
OBSERVACIONES			NORMA	
NOTA			NUMERO	LAMINA
			Dibujado por M. Barba	Fecha 23-XI-75
ESCALA 1:20 ; 1:10	SOPORTE AISLANTE		Aprobado por	Fecha
CODIGO			Visto bueno por	Fecha
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			FAC. ING. ELECTRICA DEPARTAMENTO	



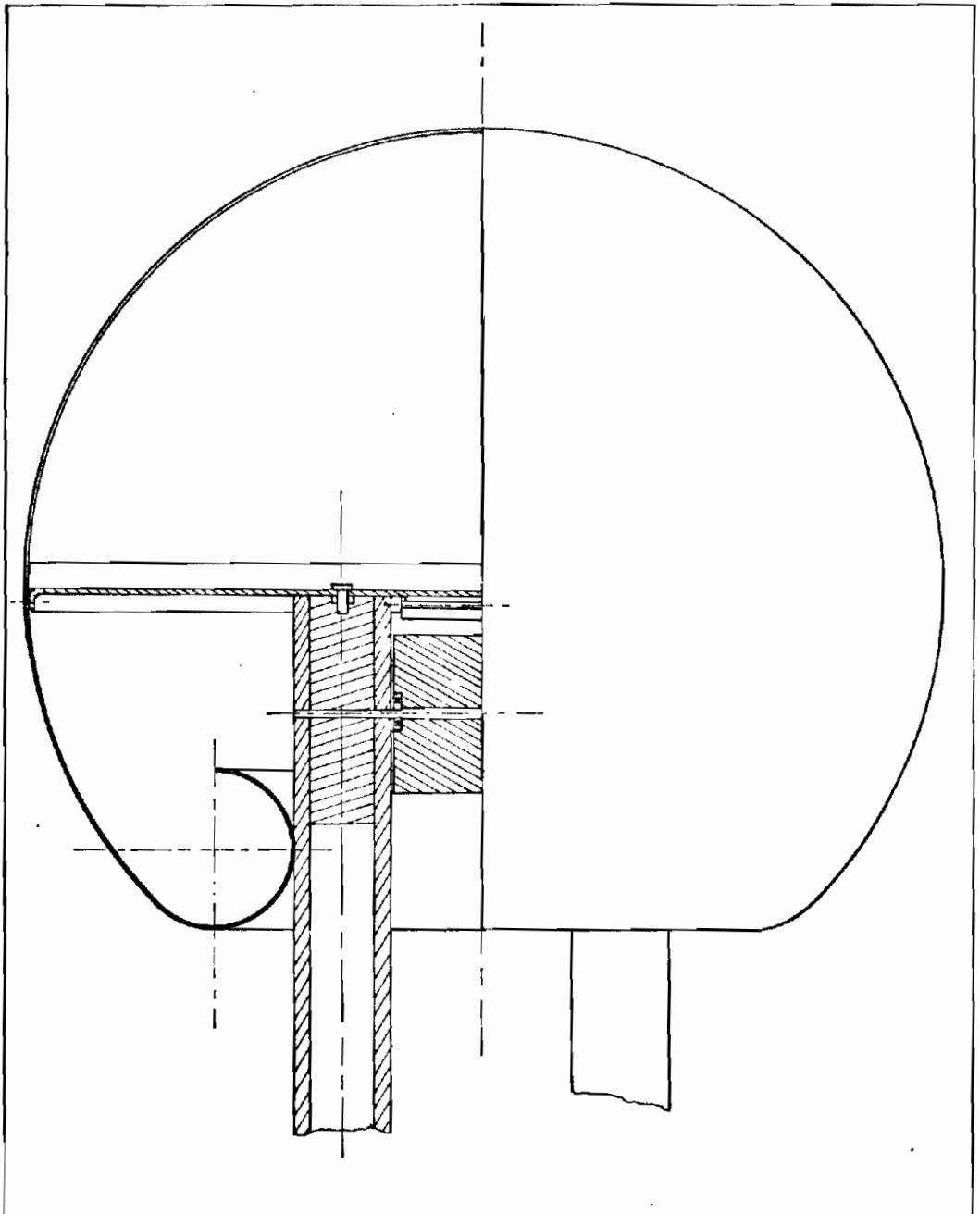
N	NOMBRE	Generador Electrostatico	MATERIAL : Fe	
OBSERVACIONES			NORMA	
NOTA : Para montaje horizontal			NUMERO	LAMINA
			Dibujado por M. Barba	Fecha
ESCALA	PLETINA DE REFUERZO		Aprobado por	Fecha
CODIGO			Visto bueno por	Fecha
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			FAC. ING. ELECTRICA DEPARTAMENTO	



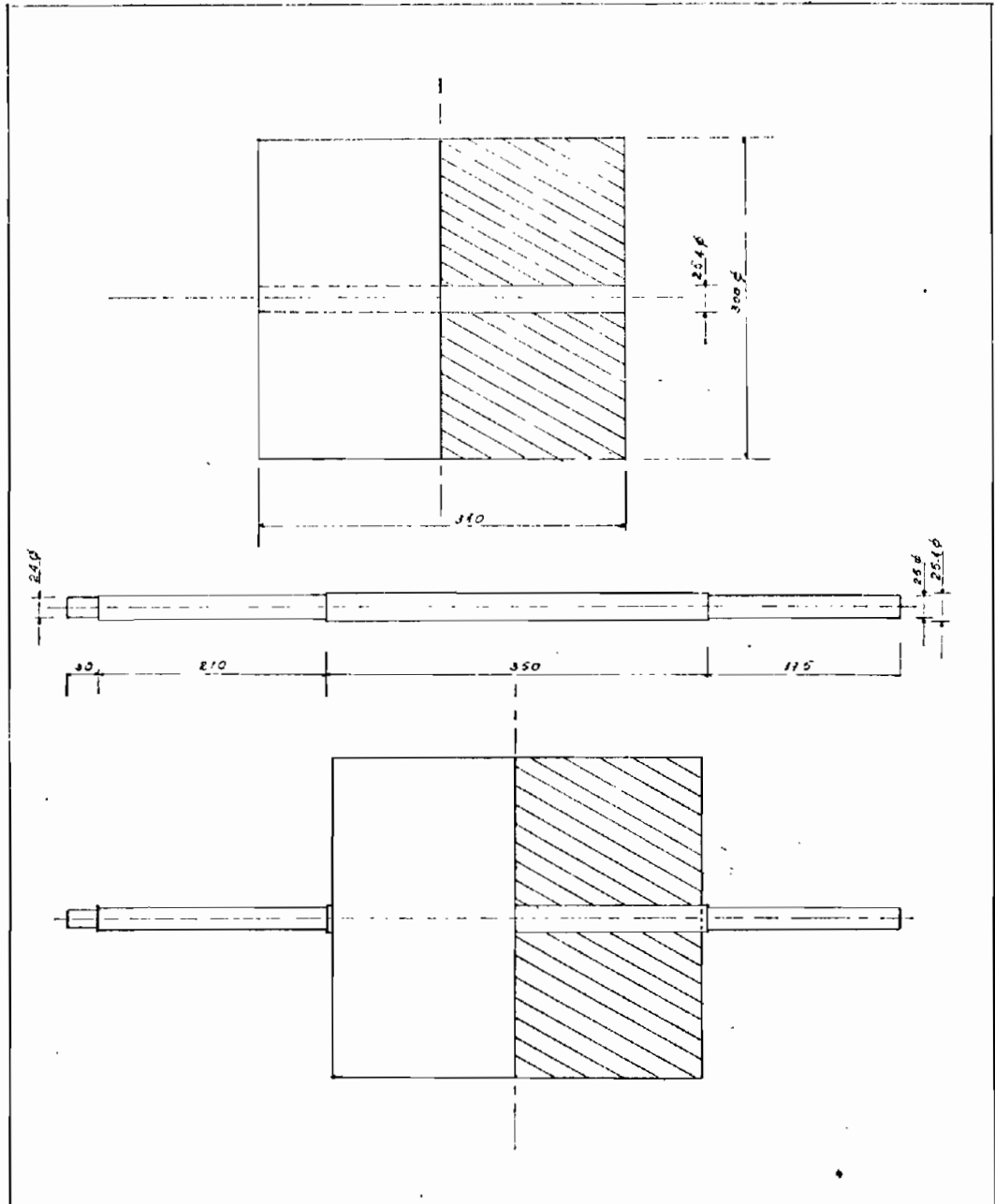
N	NOMBRE : Generador Electrostático	MATERIAL : Mad. y Ac.	
OBSERVACIONES		NORMA	
NOTA : Cojinetes de $\phi e = 62\text{ mm}$, $\phi i = 25\text{ mm}$		NUMERO	LAMINA
e = 17 mm		Dibujado por M. Barba	Fecha 23-XI-75
ESCALA 2:10	POLEA SUPERIOR	Aprobado por	Fecha
CODIGO		Visto bueno por	Fecha
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		FAC. ING. ELECTRICA DEPARTAMENTO	



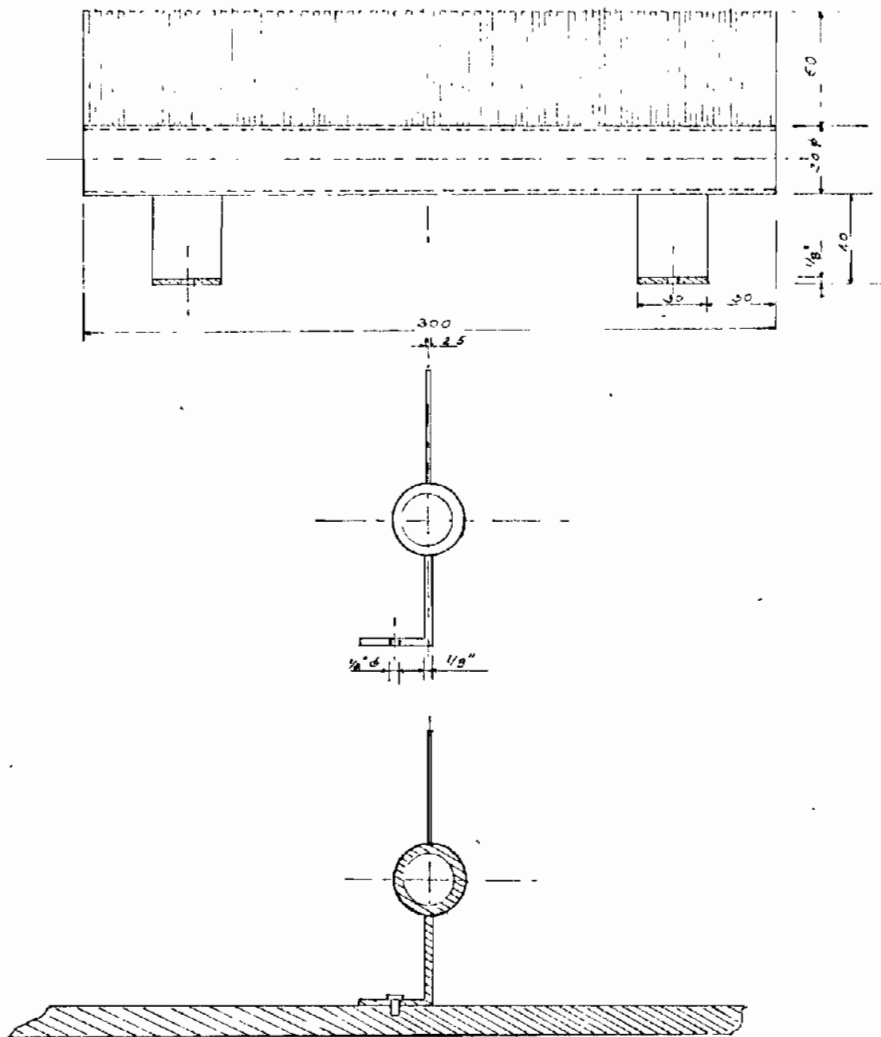
N	NOMBRE: Generador Electrostático	MATERIAL: Al.	
OBSERVACIONES		NORMA	
NOTA: Detalle de ensamble a pletina de refuerzo		NUMERO	LAMINA
		Dibujado por M. Barba	Fecha 23-XI-75
ESCALA 4:10	PEINE DE DESCARGA	Aprobado por	Fecha
CODIGO		Visto bueno por	Fecha
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		FAC. ING. ELECTRICA DEPARTAMENTO	



N	NOMBRE	Generador Electrostatico	MATERIAL
OBSERVACIONES			NORMA
NOTA			NUMERO
			LAMINA
			Dibujado por
			M. Barba
			Fecha
			23-XI-75
ESCALA	ELECTRODO RECEPTOR		Aprobado por
CODIGO			Fecha
			Visto bueno por
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			Fecha
			FAC. ING. ELECTRICA
			DEPARTAMENTO

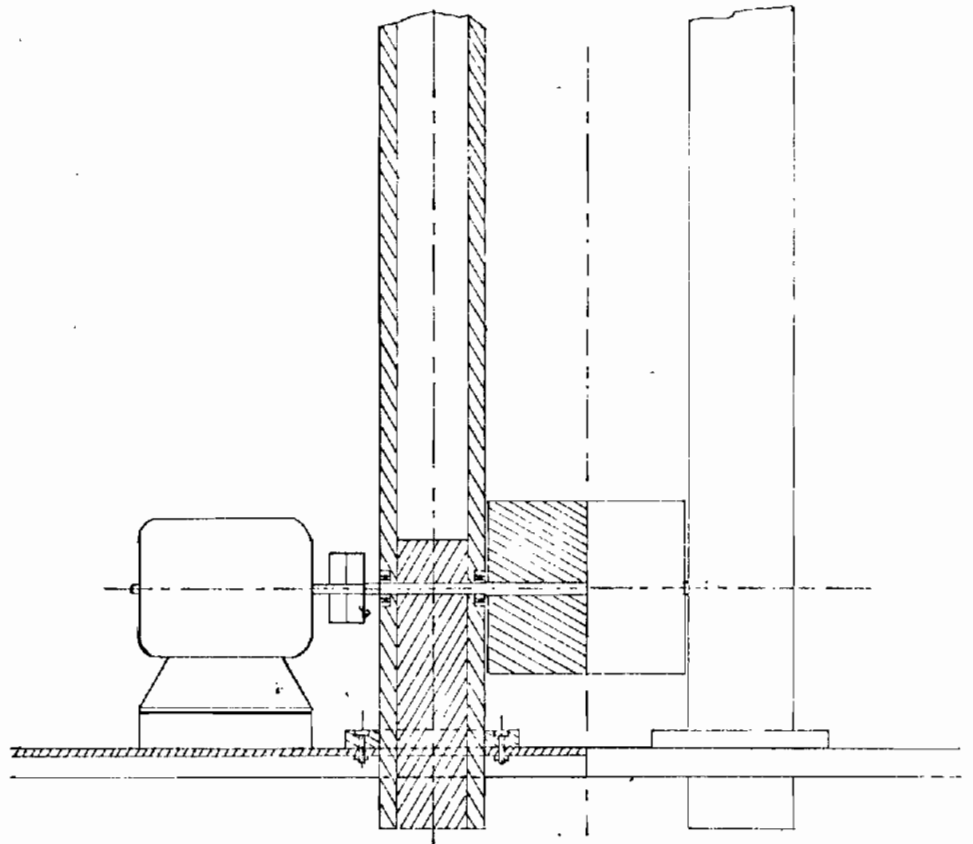


N	NOMBRE	Generador Electrostático	MATERIAL: Mod- Ac.
OBSERVACIONES			NORMA
NOTA			NUMERO
			LAMINA
			Dibujado por
			M. Porba
			Fecha
			23-XI-75
ESCALA	POLEA INFERIOR		Aprobado por
2:10			Fecha
CODIGO			Visto bueno por
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			Fecha
			FAC. ING. ELECTRICA
			DEPARTAMENTO

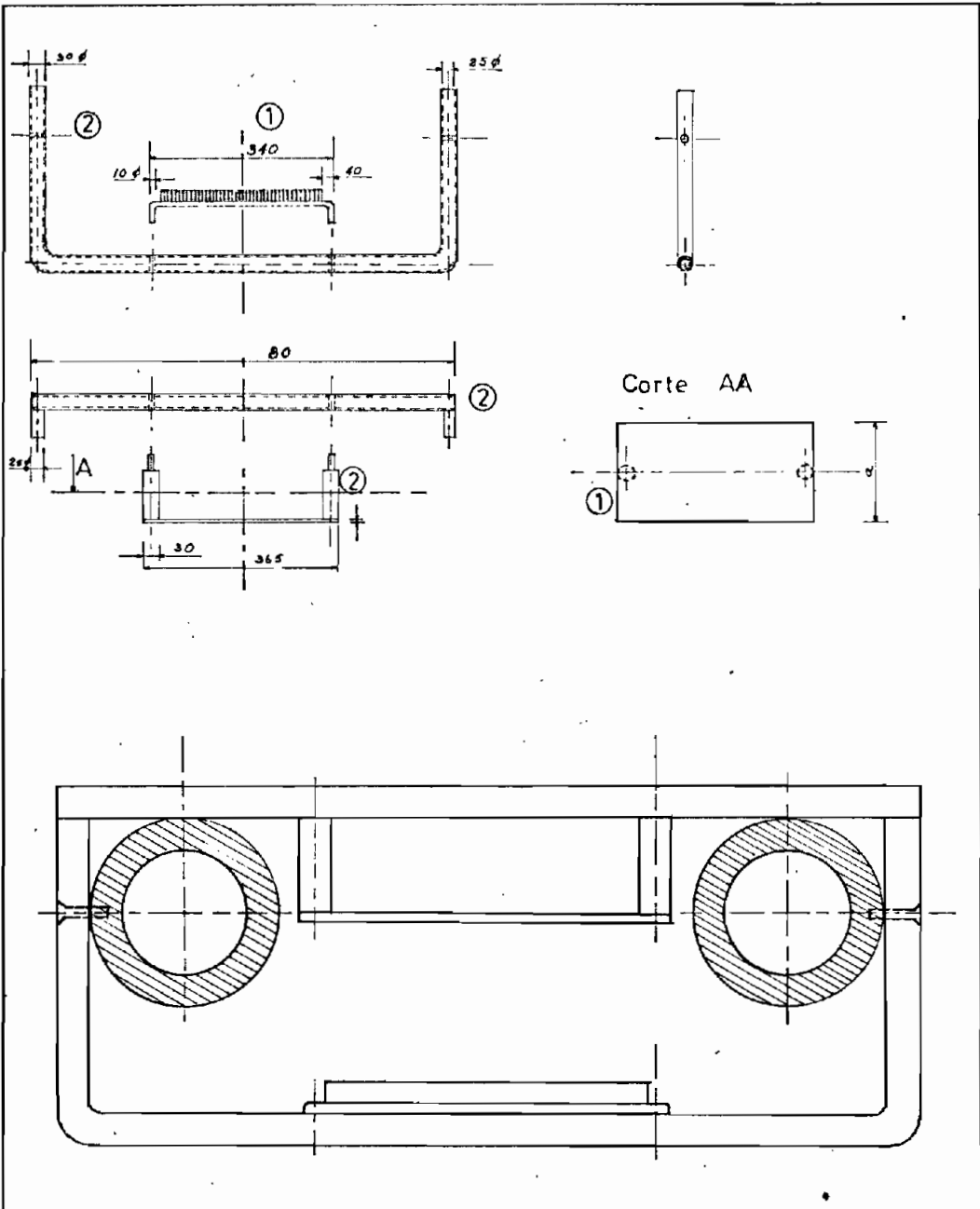


N	NOMBRE	Generador Electrostático	MATERIAL:	Al
OBSERVACIONES			NORMA	
NOTA: Detalle de ensamble a carro móvil			NUMERO	LAMINA
ESCALA 4:10			Dibujado por	Fecha
			M. Barba	23 XI/75
CODIGO			Aprobado por	Fecha
			Visto bueno por	Fecha
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL			FAC ING. ELECTRICA	
			DEPARTAMENTO	

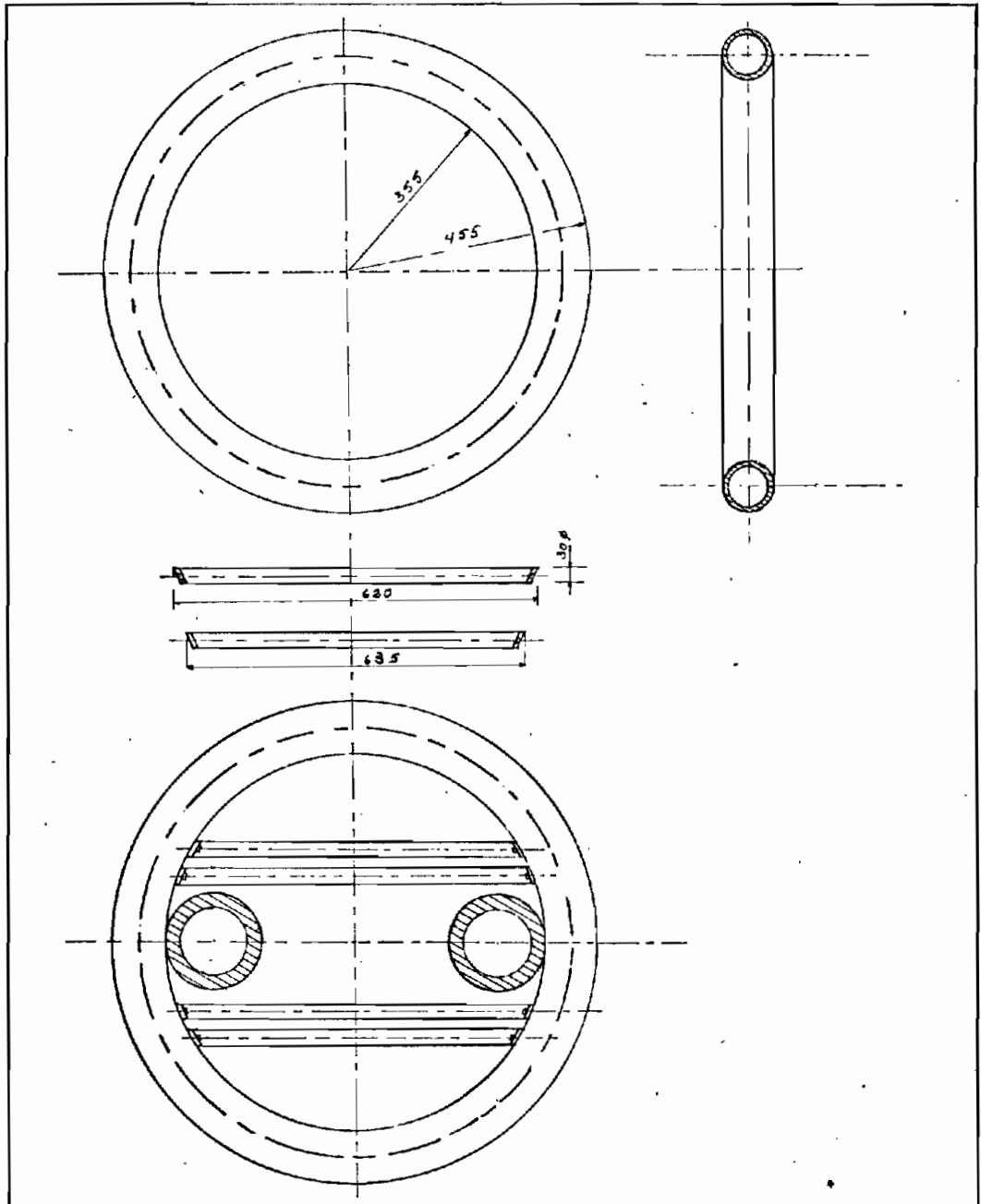
PEINE DE TIERRA



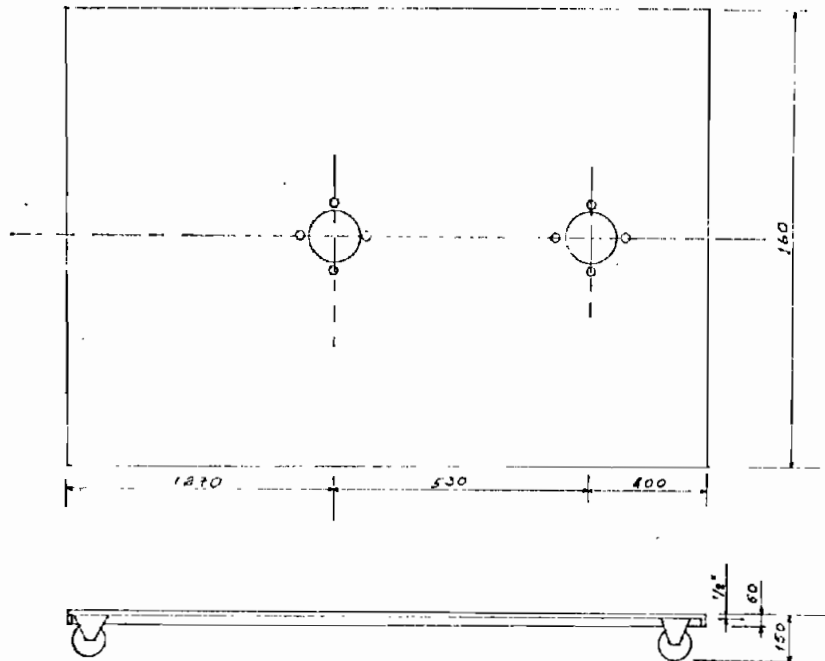
N		NOMBRE		Generador Electrostatico		MATERIAL	
OBSERVACIONES		NORMA					
NOTA		NUMERO		LAMINA			
		Dibujado por		Fecha			
		M. Barba		25-XI-75			
ESCALA		MONTAJE		BASE			
1:10							
CODIGO		Visto bueno por		Fecha			
ESCUELA		POLITECNICA		NACIONAL		FAC. ING. ELECTRICA	
						DEPARTAMENTO	



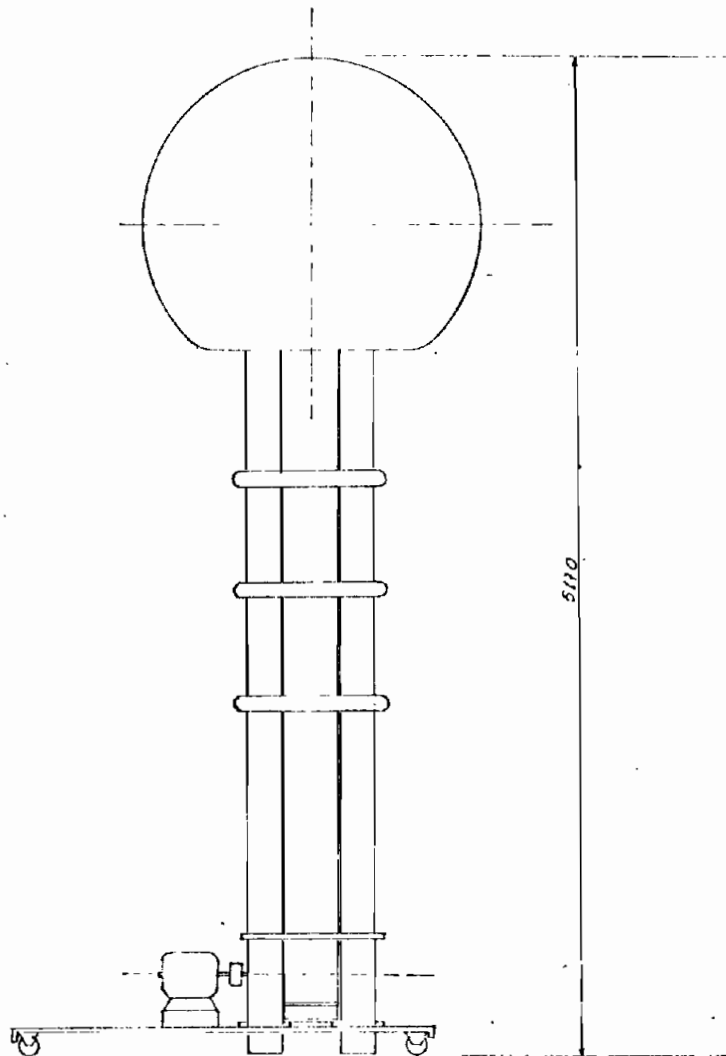
N	NOMBRE	Generador Electrostático	MATERIAL	PVC. Al
OBSERVACIONES			NORMA	
NOTA	① Aluminio ② PVC Rigido		NUMERO	LAMINA
Detalle de ensamble a soportes			Dibujado por	Fecha
ESCALA	CONDENSADOR DE CARGA		Aprobado por	Fecha
CODIGO			Visto bueno por	Fecha
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			FAC. ING. ELECTRICA DEPARTAMENTO	



N	NOMBRE	Generador Electrostatico	MATERIAL:	Al
OBSERVACIONES			NORMA	
NOTA: Detalle de ensamble a soporte			NUMERO	LAMINA
			Dibujado por:	Fecha
			M. Barba	23-XI-75
			Aprobado por	Fecha
ESCALA 1:10	ANILLO ECUALIZADOR		Visto bueno por	Fecha
CODIGO				
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			FAC. ING. ELECTRICA DEPARTAMENTO	



N	NOMBRE	Generador Electrostático	MATERIAL
OBSERVACIONES			NORMA
NOTA			NUMERO
			LAMINA
			Dibujado por
			M. Barba
			Fecha
			26-XI-75
ESCALA	BASE MOVIL		Aprobado por
5:100			Fecha
CODIGO			Visto bueno por
			Fecha
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL			FAC. ING. ELECTRICA
			DEPARTAMENTO



NOMBRE		Generador Electrostático		MATERIAL	
OBSERVACIONES				NORMA	
NOTA				NUMERO	LAMINA
				Dibujado por	Fecha
				M. Borba	25-XI-75
ESCALA	MONTAJE GENERAL			Aprobado por	Fecha
1:30				Visto bueno por	Fecha
CODIGO				FAC. ING. ELECTRICA	
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL				DEPARTAMENTO	