

# CAPITULO I

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

### 1. Alto Voltaje.

#### *1.1 Introducción.*

Los altos voltajes, en general, están formados en una estructura similar a bajos voltajes, con los cuales el estudiante está familiarizado, esto por medio de transformadores (C.A.). Los circuitos construidos en el laboratorio y su funcionamiento se puede decir son netamente didácticos, que el estudiante no desconoce totalmente la técnica a tratarse posteriormente.

Se considera instalación de alto voltaje aquella que genere, transporte, transforme, distribuya o utilice energía eléctrica con tensiones superiores a los siguientes límites:

Corriente alterna: Superior a 1000 voltios.

Corriente continua: Superior a 1500 voltios.

Para transportar la energía eléctrica a grandes distancias, minimizando las pérdidas y maximizando la potencia transportada, es necesario elevar la tensión de transporte.

Un aumento de tensión, significa una disminución de la intensidad que circula por la línea, para transportar la misma potencia, y por tanto, las pérdidas por calentamiento de los conductores y por efectos electromagnéticos.

A mayor tensión, menor intensidad en consecuencia, menor pérdida energética, lo cual es muy importante si se toma en consideración el hecho de que las líneas de alto voltaje suelen recorrer largas distancias. Además, una mayor intensidad requiere de conductores de mayor sección, y en consecuencia, con un mayor peso por unidad de longitud.

Se argumenta que las líneas de alta tensión afectan el medio ambiente y a la gente que vive cerca de las líneas de transmisión, por la radiación emitida. Por otro lado, dicha contaminación electromagnética permite el ahorro económico a las empresas u organismos de distribución eléctrica, de transportar la potencia a un voltaje elevado.

Su análisis completo requiere de una buena comprensión de muchos temas relacionados, tomando algunas Normas de Seguridad:

- La primera es enterarse, aprender y practicar las normas de seguridad sobre sistema eléctrico de potencia.
- Se debe saber que se realiza, porque se realiza, como opera y que peligro entraña cualquier circuito.
- La seguridad demanda un estado de mente alerta y un “estado físico” adecuado.
- La “suposición” debe ser eliminada, solo la “certeza” le proporcionará seguridad.
- La iniciativa debe ser analizada, el impulso y la corazonada descartados.

## ***1.2 Antecedentes.***

Históricamente, el descubrimiento de altos voltajes se remonta a la invención de la primera pila voltaica por parte del conde y científico Italiano Alessandro Volta. La corriente continua comenzó a emplearse para la transmisión de la energía eléctrica, a partir de siglo XIX, basado principalmente de Edison. En el siglo XX este uso decayó en favor de la corriente alterna que presenta menores pérdidas en la transmisión a largas distancias, siendo el padre del alto voltaje el inventor, Ingeniero mecánico e Ingeniero eléctrico **Nikola Tesla** y uno de los promotores más importantes del nacimiento de la electricidad comercial. Se le conoce, sobre todo, por sus numerosas y revolucionarias invenciones en el campo del electromagnetismo, desarrolladas a finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

Las patentes de Tesla y su trabajo teórico formaron las bases de los sistemas modernos de potencia eléctrica por corriente alterna (CA), incluyendo el sistema polifásico de distribución eléctrica y el motor de corriente alterna, es el inventor de la corriente trifásica y de los motores de inducción, que mueven en el presente todas nuestras industrias, que tanto contribuyeron al nacimiento de la Segunda Revolución Industrial.

## ***1.3 Disrupción.***

Los sistemas de energía eléctrica están sujetos a sobrevoltajes externos (rayos) y también a sobrevoltajes generados internamente (operación de interruptores), que dan lugar a altos voltajes temporales; la dependencia del tiempo en estos voltajes, se debe principalmente al hecho de que en generación de arcos eléctricos, que intervienen una avalancha de electrones que toma un tiempo finito para formarse en el sistema. El

desarrollo completo de un arco, entre los extremos de un aislador se clasifica como disrupción. Como la disrupción del aislamiento depende de la forma de la onda del voltaje.

### ***1.3.1 Disrupción en Líquidos.***

#### ***1.3.1.1 conducción y disrupción eléctrica en líquidos.***

Los líquidos dieléctricos, tales como aceites hidrocarburos constituyen un buen dieléctrico. Son mejores que los gases por su mayor densidad y mejores que los sólidos, por ser capaces de fluir, como aislantes en los equipos imaginarios. Además pueden circular y ser refrigerados disipando el calor generado.

El presente análisis se divide en dos partes: La primera referida a la conducción de líquidos “puros”, estos son aquellos con estructura simple, incluyéndose los aceites aislantes comerciales, que no permiten una adecuada reproducibilidad de los experimentos, para análisis de las teorías básicas. La segunda parte se refiere a la perforación o disrupción eléctrica de los aislantes comerciales.

➤ ***Aislantes líquidos.***- Las propiedades físicas de los dieléctricos líquidos como por ejemplo: peso específico, conductibilidad térmica, calor específico, constante dieléctrica, viscosidad, dependen de su naturaleza, es decir de la composición química, pero su rigidez dieléctrica, además está ligada a factores externos como por ejemplo: impureza en suspensión, en solución, humedad, etc., que generalmente reducen su valor, degradando la característica importante.

- ✓ Los fluidos o líquidos dieléctricos cumplen la doble función de aislar los bobinados en los transformadores y disipar el calor al interior de estos equipos.
- ✓ El líquido dieléctrico más empleado es el aceite mineral. El problema es que es altamente inflamable.
- ✓ Fluidos dieléctricos sintéticos, (hidrocarburos) con alto punto de inflamación.
- ✓ El líquido aislante sintético más utilizado desde principios de la década de 1930 hasta fines de los 70's fue el Ascarel o PCB, que dejó de usarse por ser muy contaminante.
- ✓ Entre los nuevos líquidos sintéticos destacan las siliconas y los poly-alfa-olefinas. Tienen un alto costo, eso dificulta su masificación

#### ***1.3.1.2 conducción natural.***

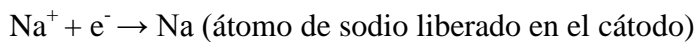
Con campos eléctricos bajos (1 Kv/cm) se obtiene resistividades para hidrocarburos, los valores mayores para gases licuados se lo obtendrá con campos más grandes.

La conductividad residual obtendrá probablemente en datos a impurezas remanentes luego de la purificación, con campos mayores (100 Kv/cm) y al acercase a la gradiente de ruptura, la corriente se incrementa y fluctúa violentamente, con tendencia a estabilizarse si el campo se mantiene.

El hexano tiene su resultado típico pero las regiones de campos bajos, la conducción circunda y está relacionado a la ionización en gases, especialmente en altas presiones, las diferencias surgen en la región de saturación o campos altos, la corriente es incrementado por emisión de electrones (debido al efecto de campo) del cátodo, por disociación de moléculas en el líquido.

➤ ***El mecanismo de la conducción eléctrica en los líquidos.-*** En los metales las cargas eléctricas circulan a través de ellos transportadas por los electrones, formando la corriente eléctrica. Estos electrones se pueden mover como partículas libres dentro del metal. Cada electrón lleva una pequeña carga eléctrica negativa. En los líquidos conductores, las cargas eléctricas son transportadas por partículas mucho mayores, llamadas iones, que son partes de átomos o moléculas.

El cloruro sódico fundido está formado por dos tipos de iones: iones sodio (positivos) e iones cloruro (negativos). La diferencia de potencial que hay entre los electrodos provoca el movimiento de los iones, siendo atraídos los iones positivos por el cátodo y los iones negativos por el ánodo. El efecto se puede describir de la siguiente forma: el ion  $\text{Na}^+$  gana un electrón en el cátodo y el ion  $\text{Cl}^-$  pierde un electrón en el ánodo:



### ***1.3.2 Disrupción en el Vacío.***

#### ***1.3.2.1 propiedades eléctricas del alto vacío.***

El uso del vacío como dieléctrico es evidente, si se considera que la corriente eléctrica depende de números de partículas con carga desplazándose en el tiempo, entonces, la ausencia de ellas en el vacío se traducirá en hacer de este un perfecto aislante. La realidad es diferente y la presencia de superficies metálicas, gases absorbidos, etc.; harán que un voltaje suficientemente alto produzca una disrupción.

### **1.3.2.2 pre-conducción.**

La disrupción en el vacío es precedida por una corriente mensurable entre electrodos. Un voltaje adecuado entre las distancias pequeñas en “gaps”, da una corriente relativamente constante en el equipo. Un incremento adicional de voltaje en el microdescargas nos da al sistema una corriente constante.

➤ **Corriente constante.-** En espaciamientos pequeños, la corriente constante es producida principalmente por emisión de electrodos, cuyos principales mecanismos de emisión en el vacío son:

✓ Emisión termiónica.- La emisión termiónica hace disminuir la energía interna del metal, causada por una energía térmica de tipo vibraciones, que provoca una fuerza electrostática que empuja a los electrones hacia la superficie.

✓ Emisión de Schotty (T-F).- Aplica en el campo eléctrico, que es moderadamente fuerte puede influir en el escape de los electrones y por tanto en la corriente de saturación, se determina la densidad de la corriente.

✓ Emisión de campo o fría.- Las intensidades de campo superiores, producen la denominada emisión fría, debido a la barrera de potencial es despreciable frente al efecto del campo aplicado por la emisión que produce a bajas temperaturas.

➤ **Microdescargas.-** El origen de las microdescargas reside y son indeseables en ciertos equipos, como generadores electrostáticos, microscopios electrónicos. Las microdescargas se caracterizan por ser pulsos auto extinguido. Este “autoextinción”

se la atribuye al descenso del voltaje a través del gap (explosor) o en otros casos, a la eliminación de hidrógeno que ha sido absorbido por los electrodos.

El primer factor es afectado por la presión y el tipo de gas, como también por el material de ánodo y la configuración de los electrodos. La duración de las microdescargas, produce un efecto de acondicionamiento de los electrodos incrementándose el voltaje de iniciación de los pulsos, pudiendo arribar a un efecto de súper acondicionamiento de duración temporal (10 – 60 min).

### ***1.3.2.3 factores que afectan el voltaje de disrupción.***

El voltaje de disrupción de gran vacío se define como aquel que un gap puede soportar indefinidamente, pero un pequeño incremento de él, produce la descarga. La definición más útil en Ingeniería Eléctrica de Potencia y se usa como tal en el futuro.

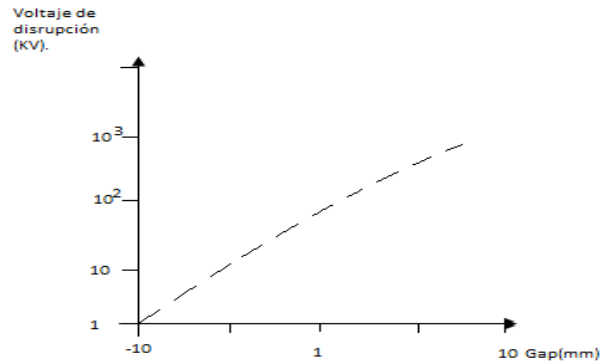
➤ ***Separación de electrodos.-*** Es importante conocer el comportamiento del vacío como aislante, tanto para pequeños como para mayores separaciones de electrodos, porque se pasa por ambos regímenes en un interruptor, por ejemplo. Para espaciamientos menores que 1 mm, se ha encontrado que el voltaje de disrupción  $V$  es aproximadamente proporcional a la longitud  $d$  de dicho gap, esto es:

$$V = K \cdot d ; \quad (d < 1 \text{ mm})$$

En donde  $K$  es una constante, en estos casos el esfuerzo eléctrico de disrupción es alto, del orden de  $10^6$  V/cm (ver graf.1), y la dependencia lineal del voltaje con la longitud de gap, hace pensar en un mecanismo de emisión de campo para liberar electrones.



GRAF. 1  
 VOLTAJE DE DISRUPCIÓN DE ESPACIAMIENTOS  
 PEQUEÑOS AL VACIO (DESPUÉS DE LYMAN Y OTROS).



Para distancias mayores que 1 mm entre electrodos planos, la pendiente de la curva voltaje de disrupción-longitud del gap disminuye hasta cerca de  $10^6$  v/cm, como se aprecia en el graf.2.

Teóricamente y experimentalmente se ha demostrado la siguiente relación para el voltaje de disrupción  $V$  en función de la separación  $d$ .

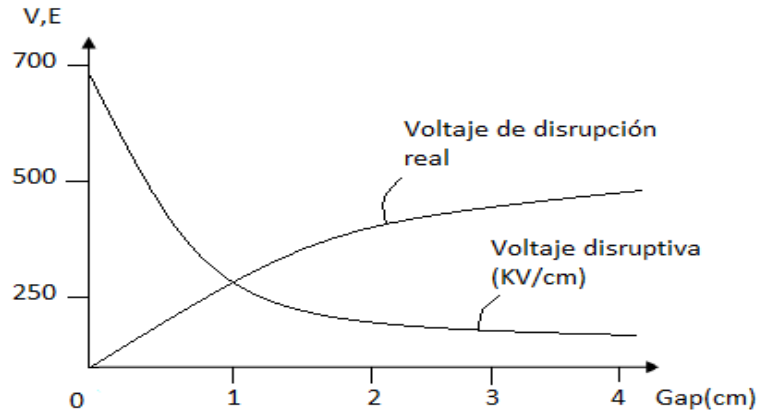
$$VE = K1. d(d > 1 \text{ mm})$$

Esto significa que también hay una influencia de la intensidad de campo media, en general se ha llegado a una expresión del tipo.

$$V = K2. dA = \pi r^2$$

En donde  $\alpha \longrightarrow \frac{1}{2}$

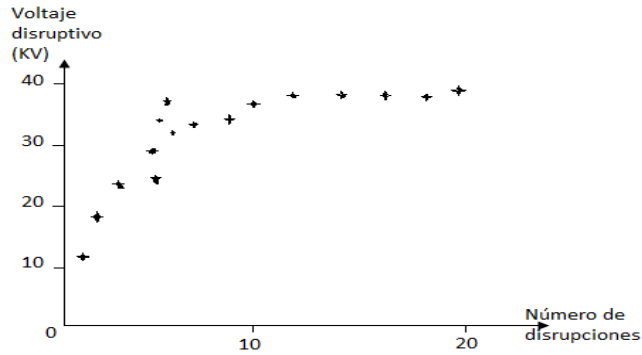
GRAF. 2  
DECREMENTO DE LA GRADIENTE DISRUPTIVA  
EN EL VACIO AL VARIAR LA LONGITUD DEL GAP.



➤ *Efectos de los electrodos.*

✓ *Acondicionamiento de los electrodos.*- La continua producción de microdescargas acondiciona los electrodos incrementando el voltaje de ruptura, como se indica en la graf.3. El preconditionamiento es necesario para estudios en el vacío, cuando se requiere la reproducibilidad de un experimento, este efecto se consigue por descargas continuas en el gap (explosor), con una descarga de irradiación luminosa en hidrogeno o calentamiento de los electrodos en el vacío a altas temperaturas, variando el tiempo en que se consigue el acondicionamiento deseado.

GRAF. 3.  
EFECTO DE ACONDICIONAMIENTO  
DE ELECTRODOS EN UN CAMPO UNIFORME, GAP (1 MM).



✓ *Material terminado de la superficie.*- Los materiales usado por diferentes investigadores difieren en su composición, por eso, solamente a manera de guía se presenta la tabla N°1, que da varios ejemplos de voltajes de disrupción, para varios materiales usados como electrodos.

El pulido de la superficie de los electrodos ha dado efectos contradictorios, aunque se ha notado un ligero incremento en el voltaje de disrupción, cuando el pulido ha sido largo y meticuloso.

TABLA. 1.  
VARIACIÓN DEL VOLTAJE DE DISRUPCIÓN DE UN  
GAP AL VACIO, DE 1 MM DE LONGITUD, ELECTRODOS DE  
MATERIAL PULIDO Y ACONDICIONADO POR DESCARGAS.

MATERIAL DEL ELECTRODO	VOLTAJE (DE AISLAMIENTO) (KV)
Acero	122
Acero "Inoxidable"	120
Níquel	96
Monel*	60

Aluminio	41
Cobre	37

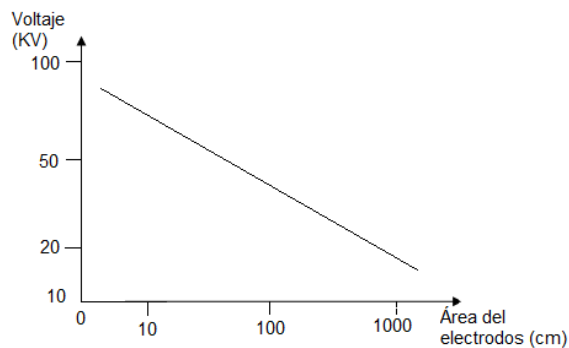
\*Aleación Níquel-Cobre

✓ *Contaminación superficial.*- Al considerar una superficie contaminada, debe tomarse en cuenta los óxidos del material de los electrodos, producidos muy rápidamente luego del pulido, además, están en vapores orgánicos y residuos del pulido (mezcla de óxido metálicos, metal y lija), todos estos residuos dificultan el estudio directo de una superficie limpia. Estas impurezas pueden reducir el voltaje de disrupción hasta en un 50%.

✓ *Área y configuración.*- El incremento en el área de los electrodos reduce considerablemente el voltaje de disrupción, como puede apreciarse en la graf.4.

GRAF. 4.

EFEECTO DEL ÁREA DE LOS ELECTRODOS EN EL VOLTAJE DE DISRUPCIÓN. GAP DE 1MM. MATERIAL: HIERRO.

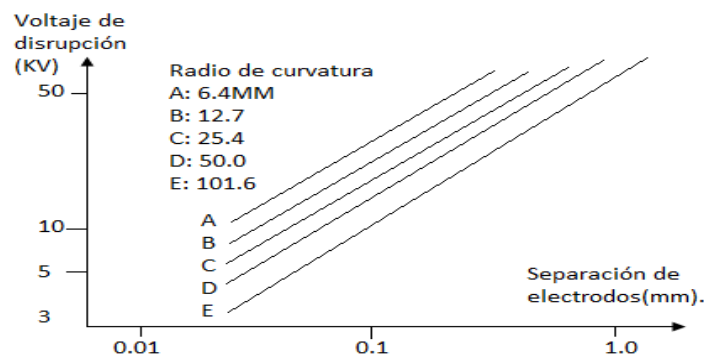


Con espaciamentos menores que 1mm y tanto para electrodos no acondicionados como para los acondicionados, se halla una dependencia en el radio de curvatura, como se indica en el graf. 5. Debe notarse que los electrodos más convexos tienen un

mayor voltaje de disrupción, aunque para un mismo voltaje, el campo eléctrico en la superficie es más alto.

Para espaciamento hasta 6 mm se ha encontrado que los voltajes de disrupción son mayores, para una configuración punta-placa, siendo la punta el ánodo y además, el voltaje de disrupción aumenta cuando se reduce el diámetro de la esfera, para espaciamento mayor que 1 cm, este efecto se invierte.

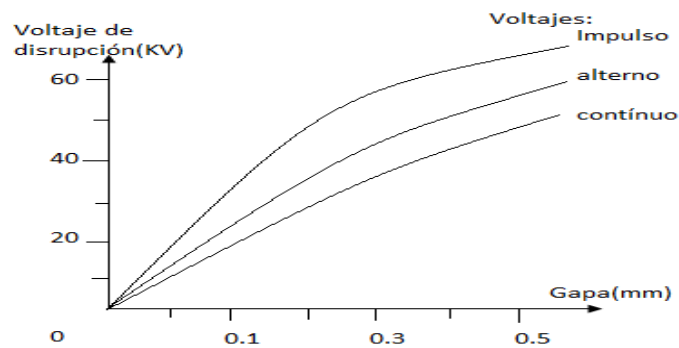
GRAF. 5.  
VARIACIÓN DEL VOLTAJE DE DISRUPCIÓN CON  
EL RADIO DE CURVATURA DE LOS ELECTRODO (DONALSON-RABINOWITZ).



✓ *Temperatura.*- Pruebas efectuadas hasta 500°C, no indicaron cambios en la rigidez dieléctrica, permite concluir que, vapores y gases orgánicos (desprendidos a 450°-500°C) no tienen una influencia substancial en el desarrollo de la disrupción. Un calentamiento sobre los 500°C, a cátodos de níquel o hierro, incrementa la rigidez dieléctrica, mientras que si el calentamiento es el ánodo, entonces la rigidez decrece. También se ha encontrado en el enfriamiento de los electrodos a muy bajas temperaturas (del orden del nitrógeno líquido), incrementa el voltaje de disrupción.

➤ *Influjo de la frecuencia del voltaje aplicado.*- Para espaciamientos menores que 0,5 mm se encontró que el voltaje de disrupción de impulso era mayor que aquel con voltaje alterno y este que el continuo como puede apreciarse en la graf.6.

GRAF. 6.  
VARIACIÓN DEL VOLTAJE DE DISRUPCIÓN  
SEGÚN EL TIPO DE VOLTAJE APLICADO (DEHOLM).

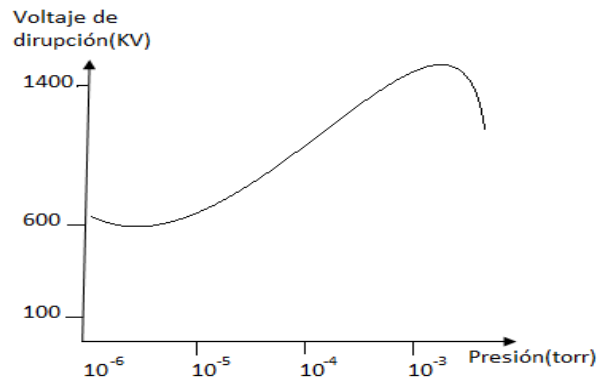


Por otra parte, para espaciamientos del orden de 2 mm, no existe dependencia del voltaje de disrupción en la frecuencia, en un rango de 60 c/s a 45 c/s.

Un caso especial ocurre cuando la superficie de los electrodos presenta un coeficiente de emisión secundaria  $Y > 1$ . En este caso, a determinadas frecuencias puede ocurrir un efecto de “cuasi resonancia”, que coincide con el cambio de polaridad de la onda ( $V(t) = 0$ ) que sube un electrón y que libera a otros, los cuales son acelerados hacia el electrodo opuesto, repitiéndose el proceso de multiplicación de electrones hasta ocasionar la disrupción.

➤ *Efectos de la presión.*- Por definición, “región de disrupción al vacío” es aquel voltaje disruptivo es independiente producido por la presión del gas formado por electrodos; por lo tanto no puede producirse un incremento del voltaje de disrupción para una descarga mayor en vacío, este es el caso, para los espaciamientos menores que 1 mm, para espaciamientos mayores en cambio hay una decisiva influencia de la presión, por lo cual el voltaje de disrupción se incrementa al reducir el vacío, que se puede observar en este gráfico. Un mayor incremento de presión provoca un brusco descenso del voltaje de disrupción.

GRAF. 7  
EFECTO DE LA PRESIÓN EN ESPACIAMIENTOS  
LARGOS (ARNOLD Y OTROS).



➤ *Recuperación de las propiedades dieléctricas.*- Para ondas de impulso de 4.5  $\mu$ s, se encontró una recuperación de 10 KV/ $\mu$ s durante los primeros 5  $\mu$ s, decayendo a 0.01 KV/ $\mu$ s alrededor de los 100  $\mu$ s. Se ha sugerido que esta recuperación incompleta se debe a partículas cargadas alojadas en sitios críticos sobre los electrodos y que provocarían la disrupción, al aplicar un campo eléctrico adecuado. En interruptores al vacío se determina que hay completa recuperación dentro de 1 a 15 segundos luego de un paso de corriente entre 400 amp y 3200 amp.

#### ***1.3.2.4 hipótesis de la interrupción.***

En el vacío los fenómenos de conducción de pre-arco, el arco mismo y la corriente de post-arco, se verán influidos por factores originados en el ambiente, que se ha creado el vacío, el nivel de vacío alcanzado, en separación, forma y material de los electrodos, el tipo de esfuerzo eléctrico al que ha sido sometida a la contaminación residual, etc. La forma como cada uno de estos factores actúan o una acción simultánea de varios de ellos ha sido extensamente estudiado por los investigadores, pero todavía subsisten interrogantes que están siendo manejados en el ámbito de hipótesis y la investigación actual trata de sustentarles. En conclusión ruptura dieléctrica del vacío es un fenómeno complicado, relacionado con una gran cantidad de procesos sobresaliendo entre ellos los debidos a la presencia de campos eléctricos fuertes.

➤ *Emisión de campo.*- Esto juega un papel importante en la iniciación de la ruptura dieléctrica, también se la considera esencial en las etapas de mantenimiento y desarrollo de los procesos de descarga subsiguientes:

La emisión de campo, es además, responsable por la aparición de corriente de pre descargas y de una interacción con gases residuales y electrodos. Por lo cual existe un cambio considerable de la microgeometría de la superficie de los electrodos, modificándose las condiciones iniciales de la ruptura dieléctrica. Por otro lado la emisión de campo es una de las causas para la aparición de micro-explosiones y emisiones explosivas de electrones en el cátodo, que desencadenan la ruptura dieléctrica.

➤ *Ruptura dieléctrica-arco.*- La etapa decisiva para iniciar la ruptura dieléctrica y por lo tanto dar inicio al arco, es la microexplosión de un centro de



emisión de campo. La explosión de un micro-protuberancia está acompañada por una transición del material de cátodo a un plasma denso, por un proceso no plenamente comprendido y bajo investigación. Estudios llevados a cabo con cátodos líquidos muestran la formación de micro-protuberancias debidas a la acción de campos eléctricos externos y su subsecuente explosión debida emisión de campo (electrones). El arco formado al abrir un circuito, muestra en sus últimas etapas puentes liquido-metal entre los electrones. La corriente, en este caso, circula por pequeñas secciones de contacto que se funden.

La emisión explosiva de electrones está ligada a una continua modificación de la superficie del electrodo. Durante la emisión de estos electrones, algunos de centros de emisión son destruidos, pero otros nuevos aparecen por la interacción del plasma denso con la superficie del electrodo. Se ha considerado la idea de que las nuevas protuberancias se convierten en otros tantos centros de explosión, de una manera cíclica, terminando proceso con la ruptura dieléctrica del vacío.

➤ *Mantenimiento del Arco.*- En la etapa inicial de la ruptura dieléctrica, aparece plasma en los centros locales de la superficie del catado y luego este proceso se extiende al resto de la superficie. Un intenso rayo de electrones es sincrónicamente excitado con el plasma. La micro-explosión opera como la macro-explosión, esto es, hay una extensión de una onda explosiva sobre la superficie del electrodo, que coincide con la extensión del plasma.

La ciclicidad del proceso, como el elemento del mantenimiento del arco ha sido confirmada experimentalmente, este proceso ocurre en campos mayores a  $10^7$  v/cm en densidades de corriente superiores a  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> y temperaturas a  $10^4$  kelvin), lo que da origen a una emisión campo-temperatura y el efecto de Schottky. El proceso

de emisión se extingue por descenso, en la densidad de corriente (originada en un redondeo de la punta de la protuberancia), así como un enfriamiento debido a la conducción del calor, evaporación, emisión de electrones que consume la energía local. Estos aseguran la emisión de campo de protuberancias separadas y su consiguiente explosión.

➤ *Corriente de post-arco y su extinción.*- Luego de la interrupción del arco y a pesar de las propiedades dieléctricas del vacío, persiste una corriente, cuyo origen ha sido atribuido a un plasma residual. La magnitud de esta corriente es dependiente del valor de la corriente del arco, presentando un incremento súbito cuando la corriente de arco ha superado un cierto valor, este incremento se lo atribuye a protuberancias al ánodo. El material de los electrodos tiene también una fuerte influencia en el valor de esta corriente de post-arco.

La duración de la corriente y su complemento tiene el tiempo de recuperación dieléctrica en el vacío, lo cual es atribuido al calentamiento del electrodo que mantiene una temperatura que permita la evaporación del electrodo, a pesar de la terminación de la corriente del arco. La velocidad de la difusión de este vapor en el gap, determina la velocidad de recuperación dieléctrica.

#### ***1.3.2.5 criterio de disrupción.***

Hay gran dificultad en seleccionar los resultados experimentales que conduzcan a un criterio de disrupción, sobre todo porque la mayoría se refiere a los electrodos acondicionados y espaciamentos muy pequeños, lo que limita el criterio del diseño de equipos usando el vacío como aislante dentro del sistema.

El criterio de Kilpatrick considera una emisión inicial de campo e iones de suficiente energía para provocar la disrupción. Estas consideraciones le condujeron a una expresión de este tipo.

$$WEc^2 \exp(-Kl.Ec) = K_2$$

En donde:

W = Máxima energía posible (e.V) de una partícula en la superficie del electrodo, instantes antes de la disrupción.

Ec = Gradiente en el cátodo (V/cm)

$$K1 = 1,7 \cdot 10^6$$

$$K2 = 1,8 \cdot 10^{14}$$

Kilpatrick concluyó, que su criterio era válido para electrodos metálicos, aunque estuvieran contaminados, los voltajes directos debe tenerse cuidado al usar este criterio porque su validez ha sido probada solamente hasta 1,5 mm. Para espaciamientos mayores de este criterio es plenamente valido si los electrodos son pre-acondicionados.

### ***1.3.3 Disrupción en gases.***

#### ***1.3.3.1 Mecanismo de la descarga en gas.***

En el estudio de descargas en gases hay que considerar dos tipos generales de descargas, auto-sostenidas y no auto-sostenidas o inducidas. El mecanismo de la disrupción, perforación, ruptura o chispa eléctrica en un gas, es una transición desde una descarga inducida a un auto sostenida. La chispa usualmente ocurre en forma

súbita, es una característica de la descarga que el voltaje a través del espacio entre electrodos descienda, debido a un proceso que produce una alta conductividad entre cátodo y ánodo.

Uno de los problemas de la física que trata de la descarga eléctrica en gases, es explicar cómo se origina esta alta conductividad, por medio de fenómenos fundamentales, atómicos y de ionización por impacto, así como el efecto de la superficie de los electrodos. Al momento se conocen dos mecanismos típicos de perforación de gas:

1. El mecanismo de Townsend.
2. El mecanismo del canal.

Cualquiera de estos mecanismos puede operar, dependiendo de las condiciones imperantes. Los procesos importantes de ionización en la perforación o ruptura eléctrica pueden clasificarse como: procesos del gas, que involucran impactos de electrones, iones y fotones, contra moléculas del gas; la participación de los electrodos tienen lugar en su proceso y superficie en sus cercanías.

➤ ***descarga eléctrica en gases.***- Una descarga eléctrica en un medio gaseoso, es un fenómeno en el que un gas, que normalmente, no conduce la electricidad, empieza a hacerlo debido a la ionización de sus átomos, como consecuencia de la influencia de una fuente energética (de calor, de radiación o de un campo eléctrico, que provoca una diferencia de potencial entre los electrodos entre los que se sitúa el gas). La conducción eléctrica a través de este gas ionizado (en adelante, plasma) no sigue la ley de Ohm, sino que se rige por los procesos físicos elementales que se dan entre las partículas cargadas (electrones, iones, átomos y moléculas excitadas) transportadas en el plasma y producidas y absorbidas en los electrodos.

De hecho, para poder realmente comprender las descargas eléctricas en gases, se deben analizar el comportamiento de dichas partículas y los procesos fundamentales que se producen en y entre dos zonas:

- ✓ Columna de plasma, formada por la ionización del medio gaseoso.
- ✓ Región de los electrodos, región anódica (próxima al ánodo (+) y región catódica próxima al cátodo (-), esta última, de gran importancia, donde surgen los electrones, que junto con los iones, son las partículas fundamentales en los procesos de descarga.

➤ *Conducción eléctrica en los gases.*- Los gases normalmente no son buenos conductores (si lo fueran, todas las pilas y las baterías se descargarían rápidamente al producirse cortocircuitos a través del aire), pero sometidos a tensiones eléctricas muy altas o a presiones muy bajas pueden conducir la corriente eléctrica. El rayo es un ejemplo extremo del paso de electricidad a través de un gas, mientras que los tubos fluorescentes normales o los anuncios de neón también constituyen ejemplos donde se utiliza el paso de una corriente eléctrica a través de un gas.

➤ *Generación de avalanchas de electrones.*- La ionización por impacto de electrones es probablemente el proceso más importante en la perforación de gases, pero como se verá este proceso solamente no es suficiente para producir su ruptura eléctrica.

Se considera un sistema de electrodos en placas paralelas en una capa atmosférica gaseosa, al insertar un cierto número de electrones son originados en las placas. Al aplicar en el campo eléctrico a electrodos, estos electrones serán acelerados hacia el ánodo ganando una energía según la ecuación:

$$\xi = e F.X - \frac{1}{2} m v^2$$

En donde:

$e$  = Carga del electrón.

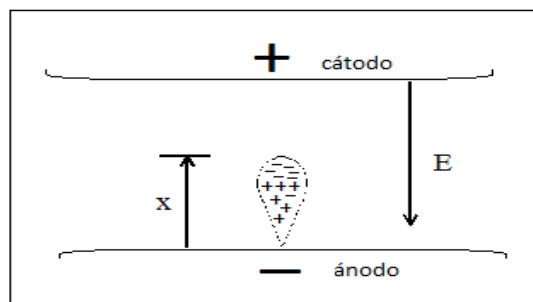
$m$  = Masa del electrón.

$v$  = Velocidad del electrón luego de correr una distancia  $x$ .

Algo de esta energía se pierde por colisiones dispersantes de los electrones contra moléculas neutras del gas (choques elásticos) pero también pueden ocurrir choques inelásticos en los cuales los electrones pueden excitar las moléculas de gas.

El nuevo electrón (producto de la ionización) junto con el electrón primario, repetirá el proceso descrito y finalmente una avalancha de electrones alcanza el ánodo.

GRAF. 8.  
DISRUPCIÓN DE CARGAS EN UNA AVALANCHA.

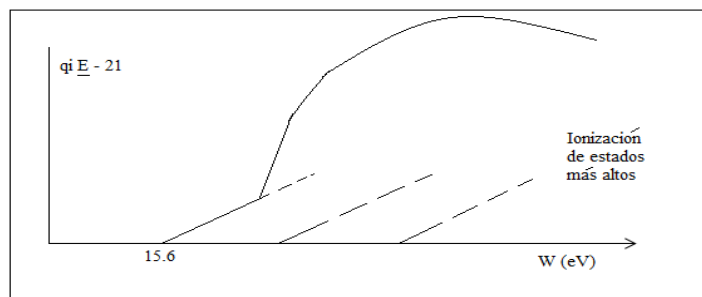


➤ *Sección transversal de choque (qe).*- El proceso de impacto o choque de electrones, descrito previamente, sigue las leyes probabilísticas y el número posible de choques es definido en términos de estas leyes, por medio de la llamada “sección transversal de choque”. Este permite calcular la posibilidad de choque que puede tener una partícula en un medio determinado.

➤ *Excitación del gas.*- Para energías menores se presenta este fenómeno, los electrones polarizan a los átomos, teniéndose entonces una interacción “electrón-dipolo inducido” y las secciones transversales (ángulos de deflexión) vienen a ser dependientes de la energía. Si el electrón se demora menos en el campo “deflector”, menos será reflejado por este campo (viceversa), consecuentemente la sección es menor para electrones rápidos.

➤ *Ionización del gas.*- Para corrientes de alto voltaje, se presenta una probabilidad (mensurable), de que ocurra ionización de las moléculas del gas. La sección transversal, en dependencia de la energía tiene la forma de gráfico que indica a continuación:

GRAF. 9.  
EJEMPLO DE DEPENDENCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN LA ENERGÍA DE LOS ELECTRONES IMPACTANTES, CON PRODUCCIÓN DE IONIZACIÓN DE LAS MOLÉCULAS DE GAS, CASO DE NITRÓGENO.

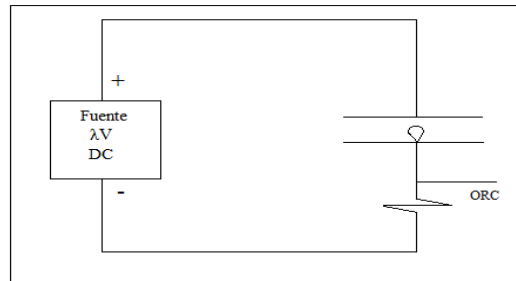


### 1.3.3.2 Desarrollo de la descarga.

Al considerar el arreglo de la graf.10, se aplica un voltaje constante  $V$  al gap, a través de la resistencia  $R$ . Si  $RC \tau^-$  la caída de voltaje  $V_L(t)$  a través de  $R$ , ampliada

suficientemente y observada en un osciloscopio, indica la corriente de los portadores de la avalancha.

GRAF. 10.  
CIRCUITO EXPERIMENTAL PARA DETECTAR  
AVALANCHAS ÚNICAS.



El pulso de corriente producido por la avalancha, se comienza con un electrón único desde el cátodo, que está compuesto por dispositivos electrónicos, esto seguido por componentes de electrones positivos, que viajan lentamente hacia el cátodo.

Las ecuaciones consideran que una carga que se mueve dentro de un gap de campo eléctrico uniforme de longitud  $d$  y con una velocidad  $v$ , produce una corriente en el circuito, dando la siguiente ecuación:  $i = q.v/d$ .

### ***1.3.3.3 mecanismo de disrupción Townsend.***

Efecto Townsend, es un fenómeno físico que involucra dispersión de electrones de baja energía por átomos de un gas noble.

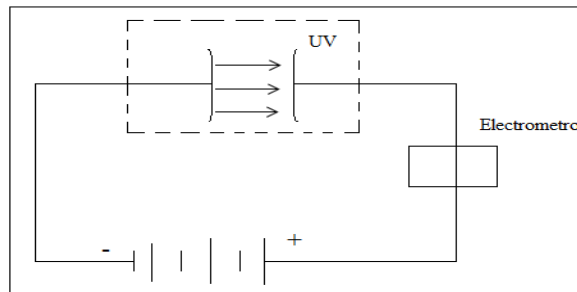
Cuando un electrón se mueve a través de un gas, su interacción con los átomos del gas genera una dispersión. Estas interacciones están clasificadas como inelásticas,



cuando causan excitación o ionización del átomo del gas, y elásticas cuando no la causan. Debido a que los átomos de un gas noble tienen una energía de ionización relativamente alta y los electrones no tienen suficiente energía para causar niveles electrónicos excitados, la ionización y la excitación del átomo son poco probables y la probabilidad de dispersión elástica sobre todo el ángulo sólido es igual a la probabilidad de colisión.

Los experimentos de Townsend consideran, la medida de la corriente promedio de disrupción en gaps forma un campo uniforme al aplicar voltajes estáticos. El arreglo utilizado en el graf.11, en donde la luz ultravioleta al impactar contra el cátodo libera los electrones iniciales de la descarga este mecanismo es matemático.

GRAF. 11.  
ARREGLO PARA ANÁLISIS DE LAS  
CORRIENTE PROMEDIO DE PRE-DISTRIBUCIÓN.



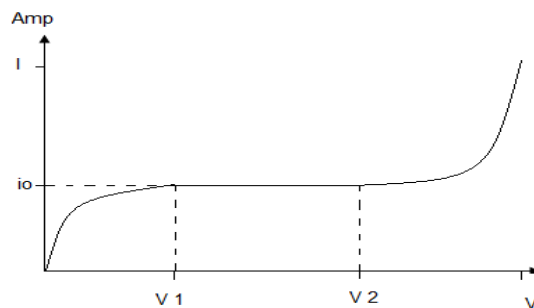
Para comprender mejor la teoría de descarga eléctrica atmosférica es necesario hacer una breve introducción a las dos teorías de descargas en gases actualmente reconocidas como teoría de Townsend y la teoría de canales.

➤ **Teoría de Townsend para descargas eléctricas en gases.-** La investigación que se realizó para formular su teoría se basó en el planteamiento de dos coeficientes que modelan tanto el comportamiento de moléculas de gas, como la influencia de los electrodos en el proceso de descarga eléctrica en gases.

Los dos coeficientes que modelan tanto el comportamiento de las moléculas de gas, como la influencia de los electrodos en el proceso de la descarga eléctrica en gases.

Primer coeficiente de Townsend, estudio el comportamiento dieléctrico de los gases mediante el análisis de la variación de la corriente medida entre dos electrodos paralelos en función de la tensión aplicada, encontrando que esta corriente se incrementa proporcionalmente con la tensión, hasta un valor a partir del cual se satura.

GRAF. 12.  
RELACION VOLTAJE - CORRIENTE  
ANTES DE LA DESCARGA.

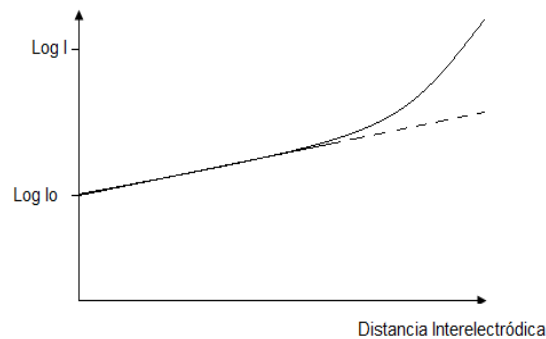


El valor de saturación de la corriente puede ser superado incrementando el voltaje, con lo cual la corriente presentará un comportamiento exponencial, el cual fue

explicado en términos de números de pares de electrones disociados producidos por un electrón que se desplaza en centímetro dentro en la dirección del campo eléctrico. A este concepto Townsend le llamo el “primer coeficiente de ionización”.

Segundo coeficiente de Townsend, de acuerdo a la curva de  $\log I$  vs  $d$  muestra una línea recta de pérdida  $a$  dada,  $E$  se mantiene constante, sin embargo, Townsend comprobó que, a partir de cierto valor de  $d$ , se presenta no linealidad en la curva, tal como indica en el gráfico.

GRAF. 13.  
RELACION DE DISTANCIA INTERELECTRODICA  
CORRIENTE LOGARITMICA EN LA CURVA.



Esta no linealidad, Townsend planteo para el segundo coeficiente que debería afectar el comportamiento de dicho corriente. Primero considera la liberación de electrones de cátodo por la incidencia de los mismos, de acuerdo con el mecanismo anterior. Este segundo coeficiente es el número de “electrones de sucesión que son sacados por los iones positivos al golpear con la superficie metálica del electrodos”.

➤ *Clasificación de descargas eléctricas en gases.*

En el actual estado de la técnica, las descargas eléctricas en gases se clasifican genéricamente, atendiendo a dos criterios:

Fuente de ionización y Ruptura del gas

En fuente de ionización son el no auto-sostenidas o no espontaneas y auto-sostenidas o espontaneas.

✓ La no auto-sostenidas o no espontaneas, en este tipo de descarga, la conductividad eléctrica de gas se mantiene fuentes exteriores de ionización. Al mismo tiempo el efecto de una radiación, puede “arrancar” electrones de un átomo o de una molécula neutra, ionizando por tanto, los átomos y moléculas del gas, denominándose a este tipo de ionización fotoionización.

✓ La auto-sostenidas o espontaneas, este tipo de descarga la conductividad eléctrica es mantenida por su propia descarga, sin ninguna participación de una fuente exterior de calor o radiación. También se dan procesos de termoionización y fotoionización, pero no origen de fuentes externas si no en la radiación y calor generados en la misma descarga.

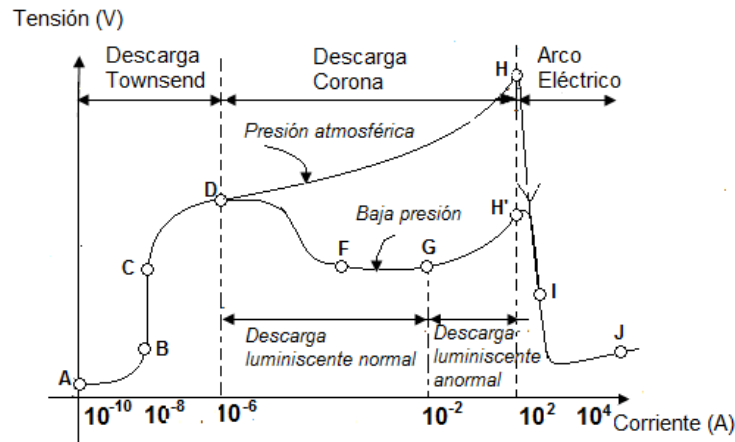
En la ruptura de gas

✓ Las descargas parciales son descargas eléctricas de pequeña energía y duración transitoria, en las que el medio gaseoso no es atravesado por completo por la corriente, no produciéndose la ruptura del mismo.

✓ Las descargas eléctricas disruptivas son aquellas descargas eléctricas, en las que la corriente consigue atravesar por completo el gas que separa a los electrodos a diferente potencial. En las descargas disruptivas, el gas ionizado produce un camino que permite el paso de la corriente de un electrodo a otro.

En la siguiente figura se representa en forma esquemática, de voltaje – corriente, características de distintos tipos de descargas eléctricas en gases:

GRAF. 14.  
CURVA VOLTAJE-CORRIENTE DE DIFERENTES TIPOS DE DESCARGAS ELECTRICAS EN GASES.



Como se aprecia en la fig para tensiones pequeñas la corriente de la descarga se crece con la tensión (Zona A - B). Esto ocurre, hasta que la tensión adquiera un valor de saturación, debido a que el tiempo de transito de las cargas es menor que el tiempo de creación de dichas cargas.

Para las tensiones superiores a la de saturación (C - D), la descarga se desarrolla por el mecanismos de multiplicación por avalanchas, con emisiones de electrodos por parte de cátodo, denominada zona de descarga Townsend, que es una región de descarga oscura (no provoca ninguna emisión de radiación lumínica) y se dan corrientes muy débiles ( $10^{-8}$  A).

En el punto D, se puede dar dos situaciones:

Bajas presiones (p.d) en relación de baja, presiones atmosféricas (p.d) en relación de subida y régimen de descargas a bajas presiones. En el punto D, empieza la descarga

luminiscente, que operan a bajas corrientes y la presión, los electrones se emiten por impactos de electrones con el cátodo frío. La transición D – F se genera una distribución de campo eléctrico elevado en el cátodo que mantiene constante y que se conserve frío, para que no genere suficiente corriente eléctrica. En la zona F - G la tensión de la descarga es constante. La intensidad se varía gracias a que el área transversal de descarga va creciendo.

En la zona D - G, se le conoce como régimen de descarga luminiscente normal y la zona G - H, ha agotado la capacidad de crecer en intensidad aumentando el área y comienza a requerir más tensión para multiplicación de electrones, invadiendo la zona de cátodo. En el punto H, la corriente es tan intensa produciendo emisión termoiónica y dando lugar a un arco, región tras el punto I. La región H - I, la caída catódica para el arco, es más pequeña que la descarga de luminiscente D - F.

✓ *Regímenes de descarga a presiones atmosféricas.*

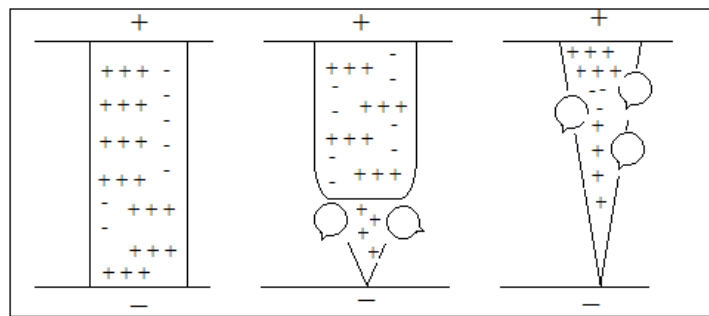
Punto D se inicia una descarga denominada corona. La corona es una descarga de baja corriente ( $10^{-6}$  A) a presión atmosférica. En el punto H se produce la descarga en chispa, que es un régimen transitorio que se crea un canal ionizado que une ambos electrodos.

El arco en la región I - J, se denomina arco no térmico, porque el plasma que genera no es un equilibrio termodinámico (temperatura de electrones, iones y neutros son diferentes). Los arcos más allá del punto J, se denomina arcos térmicos, que constituyen un plasma cercano al equilibrio termodinámico.

### 1.3.3.4 criterio de disrupción.

En este caso no ha sido determinado matemáticamente, sino que experimentalmente se ha determinado que existe un número pequeño de electrones, que provocan este segundo mecanismo, el orden de la cantidad de electrones necesarios fue determinado por el profesor Reather, se puede ver en la graf.15, para el caso del aire que ha servido como base del siguiente análisis

GRAF. 15.  
CANAL EN DIRECCIÓN DEL CÁTODO (MEEK Y CRAGGS).



Teoría de canales para la descarga eléctrica en gases, esta teoría surge de la necesidad de explicar algunos fenómenos de la ruptura dieléctrica, que bajo ciertas condiciones de presión, la teoría de Townsend no aclara satisfactoriamente. La ruptura debe producirse después del tiempo de tránsito del electrón  $t_i$  o por lo menos en ese tiempo. Los resultados experimentados demostraron que en algunas ocasiones la ruptura ocurría a un tiempo menor a  $t_i$  sin presentarse a efectos secundarios o de emisión catódica. Es así como Reather, Meek y Loeb describen el proceso de ruptura eléctrica en gases mediante la teoría de canales, dirigidos al cátodo o al ánodo.

Canal dirigido al cátodo, fue desarrollado por Meek y Loeb, para campo uniforme y se puede describirse de la siguiente forma, cuando la avalancha eléctrica cruza la región interelectrodo los portadores de carga negativa son absorbidos por el ánodo,

dejando un volumen de descargas positivas de forma cónica. Esta región de cargas positivas no es suficiente para producir la descarga, puesto que su densidad es muy bajo, no obstante, en el gas se encuentran alrededor de la avalancha, se producen procesos de fotoionización, generando electrones que se tiene alta densidad.

➤ *Aislantes gaseosos.*- Los gases aislantes más utilizados en los transformadores son el aire y el nitrógeno, este último a presiones de 1 atmósfera. Estos transformadores son generalmente de construcción sellada. El aire y otros gases tienen elevadísima resistividad y están prácticamente exentos de pérdidas dieléctricas.

El SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre) es otro gas aislante que se caracteriza por ser incoloro, inodoro, no tóxico, química y fisiológicamente inerte, no corrosivo no inflamable y no contaminante. Por sus características dieléctricas es ideal como medio aislante, tiene una rigidez dieléctrica muy elevada, tanto a la frecuencia industrial como a impulso, gracias a su peculiar característica de gas electronegativo. Con la captura de los electrones libres la molécula de SF<sub>6</sub> se transforma en iones negativos pesados, y por lo tanto poco móviles. La rigidez dieléctrica del SF<sub>6</sub> a la frecuencia industrial es por lo menos dos veces y media la del aire a la presión de 5 kg/cm<sup>2</sup>, condición que permite lograr un dado nivel de aislamiento con presiones relativamente bajas, lo cual implica sistemas de contención simples y de completa confiabilidad. Este gas tiene menor capacidad de disipación de calor que el aceite mineral, situación que se puede mejorar aumentando la presión del SF<sub>6</sub> en un recipiente hermético.

➤ *Conductores gaseosos:*  
Valencias negativas (se ioniza negativamente)



En los gases la condición que implica el paso de una corriente se conoce como el fenómeno de descarga o “ruptura” eléctrica del gas: paso de un comportamiento no conductor (baja corriente) a conductor. Tienden a adquirir electrones y a formar óxidos ácidos, por ejemplos: Ejemplos: Nitrógeno, cloro, Neón (ionizados).

➤ **Procesos físicos fundamentales en la ionización y ruptura de gases.-** Los principales procesos físicos, que tienen lugar durante las descargas eléctricas en gases. En concreto, se detallan los procesos de ionización en el gas y los principales procesos de emisión de electrones en los electrodos. Posteriormente, se detallan los mecanismos de ruptura Townsend y streamer, y por último Ley de Paschen, que permite calcular la tensión mínima de ruptura dieléctrica de un gas.

✓ *Procesos de ionización y de emisión de electrones en los electrodos*

En la siguiente figura, se detallan, en base a las diferentes partículas elementales, los procesos más importantes que tienen lugar en las descargas eléctricas:

TABLA. 2  
PRINCIPALES PROCESOS DURANTE  
UNA DESCARGA ELÉCTRICA

<b>Procesos de electrones</b>	
$e + A \rightarrow A^+ + 2e$	Ionización
$e + A + M \rightarrow A^- + M$	Captura
$e + A \rightarrow A^* \rightarrow e + A + h\nu$	Excitación
$e + A^* \rightarrow M^+ + 2e$	Efecto Penning
$e + A \rightarrow e + A$	Dispersión elástica
$e + AB \rightarrow e + A + B$	Disociación
$e + AB \rightarrow 2e + A^+ + A$	Ionización disociativa

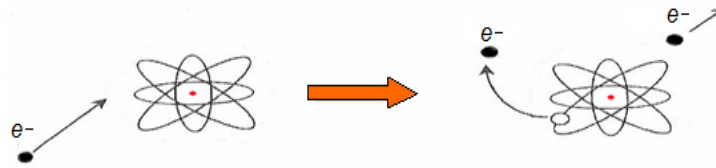
$e + AB \rightarrow A^- + B$	Captura disociativa
$e + A^+ + M \rightarrow A + M$	Recombinación
$A^+ + e \rightarrow A + h\nu$	Recombinación radiativa
<b>Procesos de fotones</b>	
$A + h\nu \rightarrow A^+ + e$	Ionización
$A^- + h\nu \rightarrow A + e$	Fotoionización
$A + e \rightarrow A^- + h\nu$	Captura radiativa
<b>Procesos con iones</b>	
$A^+ + B \rightarrow A + B^+$	Intercambio de carga
$A^+ + B \rightarrow A^- + B$	Dispersión elástica
$A^+ + B \rightarrow A + B^- \rightarrow A^+ + B + h\nu$	Excitación
$A^+ + e + B \rightarrow A + B$	Recombinación
$A^+ + B^- \rightarrow AB$	Recombinación entre iones
$A^+ + BC \rightarrow A^+ + B + C$	Disociación
<b>Reacciones químicas</b>	
$A + BC \rightarrow C + AB$	Reacción química

✓ *Proceso de ionización*

De forma genérica, la ionización de las moléculas de un gas, suele darse por las colisiones de los electrones con las moléculas de dicho gas, cuando se mueven a través del mismo, pudiendo expresarse de forma genérica como.



GRAFICO. 16  
PROCESO DE IONIZACION



✓ *Proceso de ionización del átomo de un gas*

En una primera aproximación, la ionización depende de la energía con la que los electrones chocan con la molécula del gas. La energía que es capaz de ganar el electrón al moverse a través del gas, viene dada por la expresión. Electrón =  $e \cdot E \cdot e$ .

Donde;

$e$  = Es la carga del electrón.

$E$  = Campo eléctrico que mueve el electrón.

$e$  = Camino libre que recorre el electrón.

El camino libre del electrón ( $e$ ), es la distancia media que recorren los electrones antes de colisionar con otra partícula, el valor es inversamente proporcional tanto a la densidad de los elementos circundantes, los que chocan, como al “área de colisión” del electrón y de las partículas con las que choca. Suele expresarse la energía que gana el electrón, en función de la presión o la temperatura, en función del camino libre del electrón. Para ello, partiendo de la ecuación de estado de un gas perfecto.

$$p = N \cdot k \cdot T$$

Donde,

$p$  = Presión del gas.

$N$  = Densidad del gas.

$k$  = Constante de Boltzmann ( $1,38032 \cdot 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$ ).

$T$  = Temperatura del gas.

Expresando el camino libre  $\lambda_e$ , en función de la densidad del gas:

$$\lambda_e \approx \frac{1}{N} \lambda_e$$

A partir de las ecuaciones 1 a 3, se puede relacionar la energía que adquiere el electrón con la presión del gas:

$$\Delta E_{\text{electrón}} \approx \frac{E}{p}$$

Es decir, la energía del electrón es inversamente proporcional a la densidad del gas, ó es inversamente proporcional a la presión.

Para que se produzca la ionización de un gas, la energía del electrón, debe ser mayor que la energía de ionización de la molécula del gas.

✓ *Procesos de emisión de electrones en los electrodos*

Los procesos que producen el desprendimiento de electrones de los electrodos, en especial el cátodo, son muy importantes para el desarrollo de las descargas eléctricas. Los electrones abandonan los electrodos, cuando se les suministra la suficiente energía, siendo esta energía característica de cada material y puede ser suministrada por diferentes medios, entre los que cabe destacar:

a) Emisión termoiónica

Cuando el metal del electrodo alcanza una temperatura superior a 1500° K, los electrones se mueven más rápidamente, pudiendo alcanzar alguno la energía necesaria para abandonar el metal.

b) Emisión fotoeléctrica

Los electrones saltan de la superficie del electrodo por el impacto de fotones sobre la misma, cuando la energía de los fotones incidentes es superior a la banda de conducción del metal de los electrodos.

c) Emisión por impacto de iones positivos o átomos excitados

Los electrones saltan de la superficie del cátodo cuando ésta es bombardeada con iones positivos o átomos metales estables.

d) Emisión por efecto de campo

Se emiten electrones desde la superficie del metal, al aplicar un campo eléctrico fuerte, efecto conocido como Shottky. El campo eléctrico disminuye la barrera de potencial de la superficie del metal, lo cual aumenta considerablemente la probabilidad de que los electrones, se liberen de esta barrera por el efecto túnel. Este proceso es independiente de la temperatura.

Tanto los iones positivos como los fotones y los átomos meta estables contribuyen en la segunda ionización. La importancia de cada uno de ellos depende de las condiciones de contorno.

✓ *Mecanismo de ruptura: Townsend*

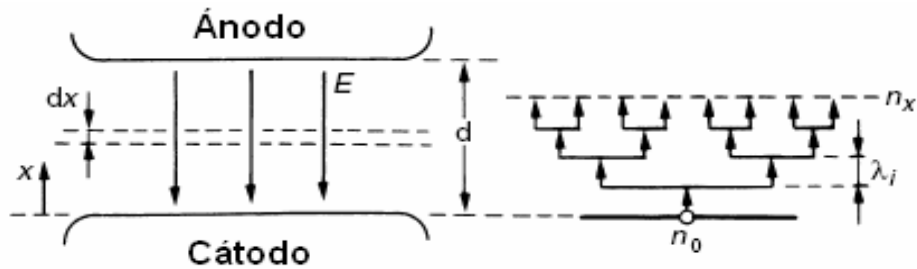
Un campo eléctrico externo (generado por la diferencia de potencial entre los electrodos) actúa sobre las cargas del medio gaseoso. Townsend descubrió la relación entre la corriente que atraviesa los dos electrodos y la tensión aplicada, diferenciando tres regiones:

Curva corriente-tensión de una descarga eléctrica

Una primera, en la que la corriente aumenta casi directamente a la tensión aplicada (debido a la formación natural de iones libres en el aire).

Cuando se alcanza el valor de saturación  $I_0$ , un tramo que permanece casi constante y uno en el que tras superar la tensión un valor  $V_2$ , la corriente aumenta exponencialmente con ella. Townsend explicó esta última etapa, mediante procesos de ionización de las moléculas del gas, por colisiones de electrones, que adquirirían suficiente energía para ionizar las partículas neutras del gas.

GRAFICO. 17  
CREACIÓN DE ELECTRONES LIBRES  
EN EL PROCESO DE AVALANCHA



Si  $n$  es el número de electrones a una distancia  $x$  del cátodo en la dirección del campo eléctrico aplicado, en una longitud  $dx$ , el incremento de electrones ( $dn$ ) viene dado por:

$$dn = a \cdot n \cdot dx$$

Si se integra la anterior ecuación en función de la distancia, se obtiene:

$$n = n_0 e^{(\alpha \cdot d)}$$

ó en términos de corriente:

$$I = I_0 e^{(\alpha \cdot d)}$$

Donde:

$I_0$ , corresponde al número de electrones libres inicialmente en el gas.  $\alpha \cdot d$ , es el término conocido como “avalancha” y representa el número de electrones libres producidos por un electrón, en el viaje del cátodo hasta el ánodo ( $\alpha$ , es el conocido “coeficiente de primera ionización de Townsend” y representa el número de electrones libres que es capaz de producir un electrón por unidad de longitud de camino libre). Cuando la temperatura del gas es constante, la variación de energía del electrón, sólo depende del valor  $E/p$ . El primer coeficiente de ionización de Townsend ( $\alpha$ ), depende tanto de la densidad del gas o presión, como de la energía que es capaz de ganar el electrón en las colisiones con los átomos del gas. Por lo tanto podemos expresar este coeficiente como:

$$\frac{\alpha}{p} = p * f \left\{ \frac{E}{P} \right\} \approx f \left\{ \frac{E}{P} \right\}$$

Se puede entender el coeficiente de primera ionización, como la probabilidad de ionización por colisión. Townsend comprobó discrepancia entre los valores de  $\alpha/p$  y  $E/p$ , debida fundamentalmente, a que en la ionización no sólo participan fenómenos por colisión de electrones, sino también de otro tipo, aspecto que Townsend descubrió, al seguir experimentando y al representar el logaritmo de la corriente eléctrica ( $\log I$ ) frente a la separación entre electrodos ( $d$ ):

Variación de la corriente en función de la separación de electrodos ( $d$ ), con  $(E/p)$  uniformes. Entonces, Townsend detectó que a partir de cierto valor de  $d$ , el crecimiento era superior al estipulado. Este alejamiento de la linealidad, postuló que era debido a un segundo mecanismo que afectaba a la corriente eléctrica. Es decir, nuevos electrones estaban participando y estos electrones extras eran liberados por el

cátodo, por uno o varios métodos. Entonces, Townsend introdujo un mecanismo de segunda ionización ( $\gamma$ ).

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha \cdot d} \pi}{1 - \gamma (e^{\alpha \cdot d} - 1)}$$

Donde,

I = Corriente que atraviesa el gas.

$I_0$  = Corriente que inicialmente abandona el cátodo.

A = Coeficiente de primera ionización de Townsend.

d = Distancia de separación entre electrodos.

$\gamma$  = Coeficiente de segunda ionización de Townsend.

Este coeficiente se ve muy influenciado por la naturaleza de la superficie del cátodo. El coeficiente  $\gamma$  es pequeño para valores de E/p pequeños y aumenta al aumentar E/p. Esto es debido a que cuanto mayor es E/p, habrá mayores números de iones positivos y fotones con la energía suficiente para liberar electrones de la superficie del cátodo. Townsend por último, estableció un umbral para que se pueda producir una descarga eléctrica:

$$r \{ e^{\alpha \cdot d} - 1 \} = 1$$

Donde,  $\alpha$ , representa el coeficiente de primera ionización de Townsend efectivo (término que resulta de restar el coeficiente de absorción del gas al coeficiente  $\alpha$ ).

$$r \{ e^{\alpha \cdot d} - 1 \} = 1$$

Si el número de pares de iones producidos en el aire por el paso de la avalancha electrónica, es suficientemente grande como para que los iones resultantes, puedan,



por el bombardeo del cátodo, liberar un electrón secundario de la superficie del mismo, que cause un nuevo proceso de avalancha. Este electrón secundario, puede provenir también de la fotoionización. Si esto sucede la descarga se auto-mantiene, es decir, puede mantenerse sin el aporte de la fuente que la originó.

Si  $r \{ e^{a.d} - 1 \} > 1$

La descarga crece muy rápidamente, porque el número de avalanchas sucesivas producidas es cada vez mayor.

$$r \{ e^{a.d} - 1 \} < 1$$

La descarga no se auto-mantiene, y al eliminar la fuente, la descarga termina extinguiéndose.

#### ✓ *Electronegatividad*

La electronegatividad es una medida de fuerza de atracción que ejerce un átomo sobre los electrones de otro, en un enlace covalente. El porqué de la existencia de esa fuerza de atracción hacia electrones de otros átomos se debe a la estabilidad que otorga la regla del octeto.

Disrupción por Townsend para gases electronegativos considerando procesos primarios y secundarios. A qué conclusión se llega.

$$n_x = n_o e^{(\alpha - N)x}$$

$$n'_o = n_o + n'_o$$

$$n_o = \gamma \cdot n'_o (e^{(\alpha - n)d} - 1) \gamma$$

Remplazando.

$$n'_o = n_o + \gamma \cdot n'_o (e^{(\alpha-n)d} - 1)\gamma$$

Despejando de la expresión anterior

$$n'_o = \frac{n_o}{1 - \gamma(e^{(\alpha-n)d} - 1)} \quad (\text{Para } x=0)$$

$$nd = n'_o e^{(\alpha-n)d} \quad (\text{Para } x=d)$$

Remplazando tenemos lo siguiente

$$nd = \frac{n_o e^{(\alpha-n)d}}{1 - \gamma(e^{(\alpha-n)d} - 1)}$$

Dividiendo para el tiempo obtenemos:

$$Id = \frac{I_o e^{(\alpha-n)d}}{1 - \gamma(e^{(\alpha-n)d} - 1)}$$

Para que exista la descarga, para que cumpla esto el denominador debe cumplir lo siguiente:

$$1 - \gamma(e^{(\alpha-n)d} - 1) = 0$$

$$\therefore \gamma(e^{(\alpha-n)d} - 1) = 1$$

Si  $\alpha - n$

$$\Rightarrow \gamma(e^{(\alpha-n)} - 1) \geq 0$$

$$\text{Si } \gamma = n \Rightarrow 1 = \frac{n}{\alpha}$$

Si se iguala la anterior expresión a cero:

$$1 - \frac{n}{\alpha} = 0$$

Encontrando factor común en la expresión que tenemos:

$$\frac{\alpha - n}{\alpha} = 0$$

Remplazando la expresión anterior con el  $(\alpha - n)$  tenemos:

$$\gamma(e^{(\alpha-n)} - 1) \geq \frac{\alpha - n}{\alpha}$$

En conclusiones se debe considerar los procesos de disrupción según la teoría de Townsend, para gases electronegativos, llegamos al siguiente resultado que indica en la expresión.

En los procesos primarios, podemos concluir que el número de electrones generados en el gas por cada electrón que sale del cátodo es casi nulo.

En los procesos secundarios al igual que los primarios, el número de electrones generados en procesos secundarios es igual a cero (0). Debido a que los gases electronegativos son buenos aislantes.

### 1.3.4 Disrupción en el Aire.

El objetivo básico de la protección de sobrevoltajes de los sistemas de energía es evitar la disrupción del aislamiento y las interrupciones, que se dan como consecuencia de daños al equipo. Los aisladores más comunes que se emplean en el aparato de un sistema de energía y sus características son:

TABLA. 3.  
AISLADORES COMUNES EN LOS APARATOS DE ENERGÍA.

Aislador	Disrupción, MV/m	Resistividad, $\Omega.m$	Permeabilidad Relativa ( $\epsilon_r$ )
Aire	3	$\infty$	1
Aceite	10	$10^4 \times 10^{10}$	2,2
SF <sub>6</sub>	15 a 1 ó 59 a 5 atm		
Mica	100	$10^{11}-10^{15}$	4,5- 7,5
Porcelana	10	$3 \times 10^{12}$	5,7
Vidrio		$10^{12}$	4-7

En general, en términos del daño potencial para el equipo, el aislamiento puede clasificarse en externo e interno, en aislamiento externo son: Aire, porcelana, vidrio y en aislamiento interno son: Aceite, SF<sub>6</sub>, mica.

Los efectos de disrupción del aislamiento externo no deberían ser tan destructivos como los aislamientos internos. La razón es porque el aislamiento externo es, en general autorreparable, al dejar de existir una causa de la disrupción. Por otra parte la disrupción del aislamiento interno es permanente. Al considerar la capacidad de

soporte, no interesa saber cuál dieléctrico va a sufrir primero la disrupción, sino el nivel de voltaje en el que se ha de dar la disrupción (de cualquier parte del aislamiento) aplicando las siguientes definiciones:

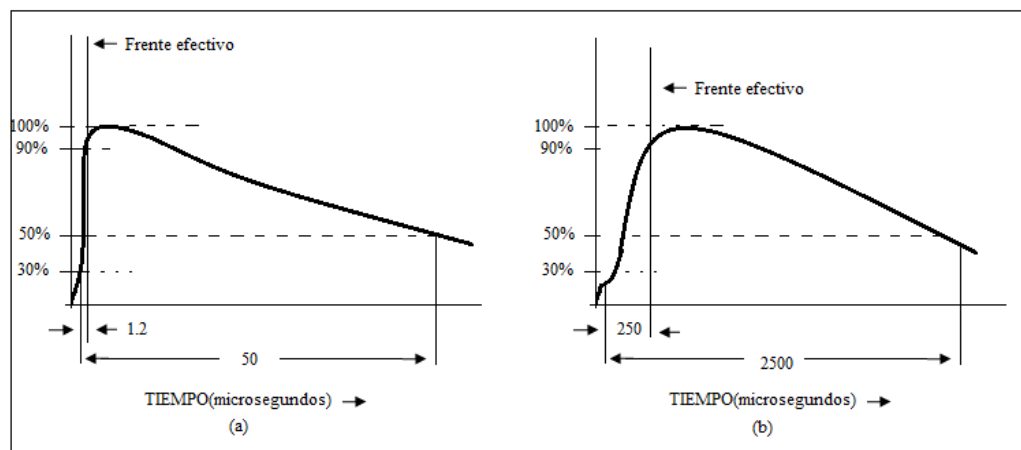
- Voltaje Soportado.- El voltaje que el equipo es capaz de soportar sin falla o descarga disruptiva al probarse en las condiciones específicas.
- Nivel de Aislamiento.- Una resistencia de aislamiento expresada en función de un voltaje soportado.
- Nivel de Aislamiento para Transitorios.- Expresado en función de valor de cresta del voltaje soportado para una forma de onda transitoria especificada, ejemplo(rayo o impulso de desconexión)
- Nivel de Aislamiento para impulso de rayo.- Expresado en función de valor de cresta del voltaje soportado de impulso de rayo.
- Nivel de Aislamiento para impulso de interrupción.- Expresado en función de valor de cresta del voltaje soportado de operación de interrupción.
- Nivel básico de Aislamiento para impulso de rayo (BIL).- Expresado en función de valor de cresta de impulso estándar de rayo.
- Nivel básico de Aislamiento para impulso de interrupción (BSL).- Expresado en función de valor de cresta de impulso estándar de interrupción.

Las formas de las ondas, donde se inducen impulsos estándares son fáciles de generar en laboratorio como tenemos en datos.

- Impulso estándar de rayo.- Impulso completo que tiene un tiempo frontal de 1.2  $\mu$ s y un tiempo a valor medio de 50  $\mu$ s. Se describe como un impulso 1.2/50. (Véase la norma American National Standard, C68.1-1698, Measurement of voltage in dielectric tests).

- Impulso estándar de interrupción.- Impulso completo que tiene un tiempo frontal de 250  $\mu\text{s}$  y un tiempo a valor medio de 2500  $\mu\text{s}$ . Se describe como un impulso 250/2500. (Norma American Nacional Standard, C68.1-1698).

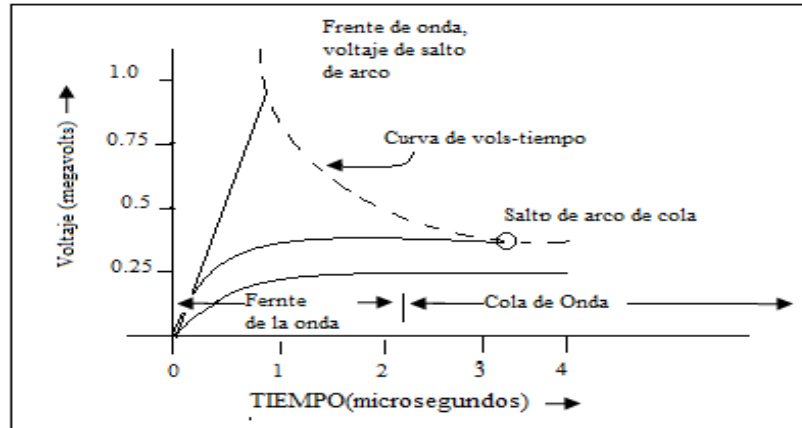
GRAF. 18 y 19  
 FORMA DE ONDA ESTÁNDAR: (18) IMPULSO ESTÁNDAR DEL RAYO  
 (19)IMPULSO ESTÁNDAR DE INTERRUPCIÓN.



Específicamente en el aislamiento del aire estará descrito, para una capacidad de soporte determinada por el voltaje y el tiempo que se den en una prueba. Aparentemente no se puede conocer el soporte real si no se realiza una disrupción en un equipo de prueba. Existiendo un soporte real que se verifico definitivamente más alto que el soporte de prueba y probablemente más alto que el soporte de diseño.

GRAF. 20.

CURVA DE VOLTS-TIEMPO DE DISRUPCIÓN DEL AISLAMIENTO.



### *1.4 Ley de Paschen.*

Si entre los parámetros que deberán ser implícitos a un gas se asume que durante el fenómeno de la descarga, auto sostenido la temperatura se mantiene constante; entonces la presión  $P$  será el único parámetro que afecta la probabilidad de colisión ionizante expresada por  $\alpha$ .

El número de iones formados por un electrón o un ion positivo en movimiento una unidad de distancia depende sobre todo de la presión del gas. Por lo tanto  $\alpha = f(p)$ .

Con la temperatura invariable, el aumento de la presión disminuye la distancia promedio entre moléculas, lo cual incrementa el número de colisiones producidas por un electrón o un ion positivo por centímetro de avance en el gas. Por efecto de la menor distancia promedio que recorren los electrones e iones entre cada choque, estos

adquieren menos energía del campo y con ello tienen menos posibilidades de ionizar una molécula. Esta energía se representa así:

$$E = e \cdot E \cdot \lambda = f(e \cdot E/p)$$

Donde:

$E$  = Energía ganada por los electrones entre choque sucesivos.

$e$  = Carga de los electrones

$E$  = Campo eléctrico al que se somete el gas

$\lambda$  = Camino libre medio, el cual es una función inversamente proporcional a la presión del gas, es decir:  $\lambda = f(1/p)$

Por tanto  $\alpha$  depende de la presión y la energía adquirida entre cada choque, así:

$$\alpha = p \cdot f_1(e \cdot E \cdot \lambda) = p \cdot f_2(e \cdot E/p) \quad \text{ó} \quad \alpha/p = f(E/p)$$

Por otra parte, el segundo coeficiente de ionización  $\gamma$  tiene el impacto de los iones positivos contra el catodo.

Es decir que  $\gamma$  depende de la energía que ganen los iones en el último recorrido libre medio antes del impacto y será función de  $E/\lambda$  ó  $E/p$ , así:

La formula  $\gamma = f(E/p)$ , Sustituyendo los coeficientes  $\alpha$  y  $\gamma$  en el circuito de ruptura, tenemos:

$$f_1(E/p) \cdot e^{p \cdot x \cdot f_2(e \cdot E/p)} = 1$$



Reemplazando  $V = E \cdot d$  en la expresión anterior:

$$f_1''(V/p \cdot d) \cdot e^{p \cdot x \cdot f_2(V/p \cdot d)} = 1$$

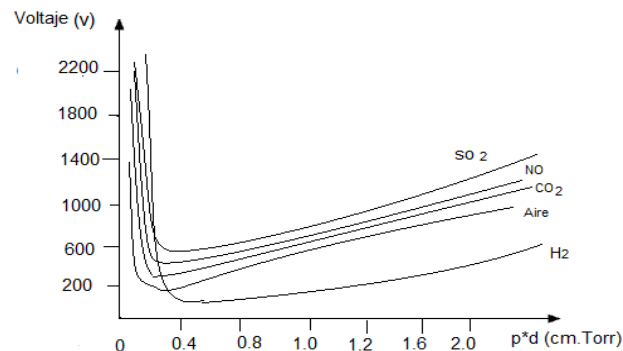
Tratando el producto  $p \cdot d$  como una variable única, encontramos una relación funcional entre  $V$ ,  $p$  y  $d$ . Esto es  $V = f(p \cdot d)$ . (1.1)

La ley de Paschen es solo una de las numerosas leyes agrupadas bajo el nombre de principio de similitud, el cual establece que si la geometría relativa de una descarga permanece inalterada, aunque las dimensiones reales sean cambiadas, el voltaje y la corriente de ruptura permanecen inalterados.

Si por ejemplo la longitud de un tubo de descarga se duplica y la presión disminuye a la mitad, el voltaje de ruptura no cambia; si todas las áreas se triplican y la presión permanece sin cambio, entonces la densidad de corriente decrece en un tercio de su valor original.

GRAF. 21.

LEY DE PASCHEN. TENSIÓN DE RUPTURA CON CAMPOS UNIFORMES EN FUNCIÓN DE P.D PARA EL AIRE, N<sub>2</sub> Y O<sub>2</sub>. P = PRESIÓN DEL GAS EN MMHG. CM; D = DISTANCIA DISRUPTIVA EN CM; TEMPERATURA DE LOS GASES 20°C. MATERIAL DEL CÁTODO: LATÓN (O<sub>2</sub> Y N<sub>2</sub>).



En la expresión matemática (1.1) se ve que el voltaje de ruptura del gas no depende de la presión o la distancia independientemente sino del producto de los dos. El gráfico indica para cada gas (aire, N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>), muestras que la curva que representa la Ley de Paschen presenta un mínimo voltaje de ruptura, a la derecha y a la izquierda del cual el voltaje es necesario para perforar el gas aumenta cuando el producto *p.d* varia.

La ley de Paschen no implica que exista una relación lineal entre el voltaje de ruptura y el producto *p.d*, aunque esa linealidad puede presentarse a raíz del valor mínimo del voltaje de ruptura hacia la derecha en la curva, es decir con el incremento de *p.d*. Si despreciamos el efecto del coeficiente secundario para valores de *p.d* mayores a (*p.d*) min, los electrones cruzan el espacio inter-electródico produciendo colisiones más frecuentes en las moléculas del gas que a valores mínimos *p.d*. por ello la probabilidad de ionización disminuye a menos que se incrementa el voltaje.

El punto de *p.d* mínimo corresponde a la falta eficiencia de ionización. Se ha comprobado experimentalmente que el voltaje de encendido depende también del material del cátodo y de la naturaleza del gas.

TABLA. 4.  
GASES MÁS COMUNES Y SUS  
CORRESPONDIENTES VOLTAJES DE ENCENDIDO.

Gas	Voltaje de encendido(V)	P.d (cm.mmHg)
Aire	327	0,567
A	137	0,9
H <sub>2</sub>	273	1,15

He	156	4
CO <sub>2</sub>	420	0,51
N <sub>2</sub>	251	0,67
N <sub>2</sub> O	418	0,5
O <sub>2</sub>	450	0,7
SO <sub>2</sub>	457	0,33
H <sub>2</sub> S	414	0,6

El mínimo voltaje de encendido medido en un gas dado depende sobre todo de la función de trabajo del material del cátodo.

#### ***1.4.1 Influencia de la forma de los Electrodo.***

La forma de los electrodos será decisiva en el voltaje al cual se inicia la descarga luminiscente en el gas, para una distancia y presión dadas, existen grandes diferencias en el voltaje, según el campo sea más o menos uniforme. Cuando los electrodos no forman campos uniformes entonces se produce una concentración del campo eléctrico, lo que favorece la emisión electrónica y por lo tanto el inicio de la descarga luminiscente.

La curva de Paschen consiste en dos ramas que se determinan respecto a la posición del potencial mínimo de encendido de la descarga. En la parte de presiones bajas respecto a la presión correspondiente al dicho potencial mínimo (la rama izquierda de la curva de Paschen) el potencial de ruptura aumenta rápido con disminución de la presión alcanzando decenas y centenas de kilo-electrón-voltios. Las descargas de alto voltaje a bajas presiones se estudiaban en los años 30-60 del siglo XX y después se encontraron casi olvidados por tener poco aplicaciones tecnológicas. El interés a este

tipo de descargas se restablece después de su adecuación a tratamiento de superficies metálicas.

La chispa generada por el rompimiento del aire ocurre cuando la fuerza del campo eléctrico se vuelve lo suficientemente intensa como para acelerar los electrones a una velocidad que los hace capaces de ionizar las moléculas del aire. Los iones acelerados en este campo liberan electrones de los electrodos mediante colisión, en donde el rompimiento ocurre cuando este proceso se vuelve sostenible. Si la corriente es limitada, la descarga es un resplandor; de lo contrario, se forma un arco eléctrico. El voltaje al cual ocurre el rompimiento depende de la forma y del material de los electrodos, de la presión del gas y de la distancia de separación entre los electrodos. La dependencia más importante es con la presión del gas y la distancia de separación de los electrodos. A presiones bajas, el rompimiento ocurre a mayores distancias. La curva de Paschen está dada por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{a \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + b}$$

Donde  $V$  es la tensión disruptiva en Voltios,  $p$  es la presión del gas, y  $d$  es la distancia entre electrodos. Las constantes  $a$  y  $b$  dependen de la composición del gas. Para el aire  $a$  presión atmosférica de 760 Torr,  $a = 43.6 \times 10^6$  y  $b = 12.8$ , donde  $p$  es la presión en Atmósferas y  $d$  es la distancia de separación en metros. Para el caso del aire, se ha llegado a la expresión:

$$V = \left(\frac{E}{p}\right)_c \cdot p \cdot d + \sqrt{\frac{K}{c}} \cdot \sqrt{p \cdot d}$$

Paschen se ha comprobado experimentalmente que funciona muy bien excepto para valores muy bajos del producto  $p \cdot d$ .

### ***1.5 Arco Eléctrico.***

Se denomina arco eléctrico o también arco voltaico a la descarga eléctrica que se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa enrarecida, que esta normalmente a baja presión y al aire libre, para realizar un arco se pondrá en contacto los extremos de los electrodos brevemente y se conecta la corriente a través de ellos, por lo tanto se puede divisar el arco.

Esta corriente provoca un gran calentamiento en el punto de contacto, al separarse los electrodos, se forma entre ellos una descarga luminosa similar a una llama. La descarga está producida por electrones que van desde el electrodo negativo al positivo, pero también, en parte, por iones positivos que se mueven en sentido opuesto. El choque de los iones genera un calor intenso en los electrodos, calentándose más el electrodo positivo debido a que los electrones que golpean contra él tienen mayor energía total. En un arco abierto al aire a presión normal el electrodo positivo alcanza una temperatura de  $3.500^{\circ}$  C. Durante el tiempo de la descarga se produce una luminosidad muy intensa y un gran desprendimiento de calor. Ambos fenómenos, en caso de ser accidentales, pueden ser sumamente destructivos, como ocurre con la perforación de aisladores en las líneas de transporte de energía eléctrica en alto voltaje o de los aislantes de conductores y otros elementos eléctricos o electrónicos.

### ***1.6 Generación de Altos Voltajes con Transformadores.***

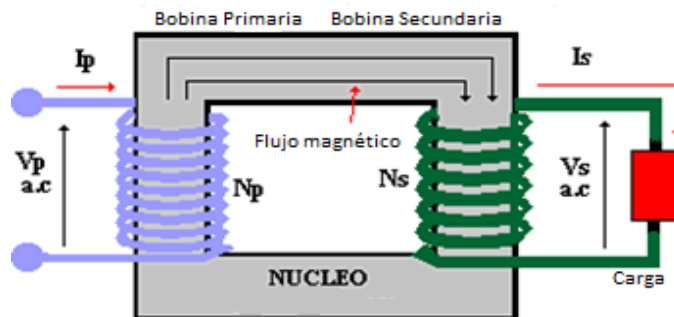
El equipo de prueba de alto voltaje se utilizara generalmente en laboratorios de investigación y en prueba de rutinas. En esta práctica es común usar un voltaje

normalizado que cumple con siguientes “norma-sugerencia” de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), en los laboratorios de investigación hay más libertad en escoger el tipo de voltaje a usarse, según las necesidades; la industria provee equipos contruidos bajo la norma usual.

El voltaje de prueba es usualmente generado por medio de un transformador de características algo diferentes a los transformadores comunes, que normalmente es monofásico de alta estabilidad de voltaje, para evitar que el mismo sea reducido por descargas parciales, de gran resistencia mecánica por un usual trabajo en corto circuito.

Se denomina transformador a una máquina eléctrica que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal, esto es, sin pérdidas, es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño, tamaño, etc.

GRAF. 22.  
TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.



La razón de transformación del voltaje entre el bobinado primario y el secundario depende de los números de vueltas que tenga cada uno. Si el número de vueltas del secundario es el triple del primario. En el secundario habrá un alto voltaje de salida.

Campo eléctrico, región del espacio donde se ponen de manifiesto los fenómenos eléctricos. Se representa por  $E$  y es de naturaleza vectorial, se mide en newton/culombio (N/C).

Potencial Eléctrico, es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva ( $q$ ) desde un punto de referencia hasta un punto considerado en contra de la fuerza eléctrica.

Efecto Corona, son pérdidas que involucran al campo eléctrico en la superficie de los conductores cuando excede a la rigidez dieléctrica del aire, es decir, cuando pasa la resistencia del aire se produce descargas por corona.

### ***1.7 Interruptores.***

El interruptor según normas IEC (Internacionales) es un aparato mecánico de conexión, con la capacidad de interrumpir corrientes de cualquier tipo y valor, hasta las corrientes de cortocircuito máximas. Lógicamente la duración de los contactos, del medio aislante, de las cámaras que contienen los fenómenos que se producen, sin mantenimiento (se produce desgaste de los contactos, de las cámaras, del medio de interrupción).

Los interruptores tienen dos posiciones estables en las que pueden encontrarse, abiertos o cerrados y tienen una duración mecánica en cuanto a maniobras que pueden hacer, esta duración en comparación con otros aparatos parece limitada.

### ***1.7.1 Características Funcionales de Interruptores***

Las características funcionales, sirven para especificar los aparatos, definiéndolos.

- Bajo voltaje
- Medio voltaje
- Alto voltaje

En interruptor de bajo voltaje puede aplicar la voltaje nominal de 230 V a 1000 V y de medio voltaje, en cambio los aparatos pueden utilizarse en unos pocos voltajes nominales, los medios voltajes utilizados en nuestro país 45 Kv a 220 Kv, y en el alto voltaje, los fabricantes plantean soluciones para su mercado de un mayor importancia para redes de alto voltaje de 52 Kv, a 245 Kv, asociado al voltaje nominal, se presentan las características de aislación, tensión de ensayo a frecuencia industrial, tensión de ensayo a impulso.

La otra característica es la corriente nominal, en bajo voltaje los valores que se presentan están asociados a los relés de protección integrados al interruptor, cada tipo de interruptor cubre hasta cierta corriente nominal máxima, 63 Amp hasta 6300 Amp. En medio voltaje los fabricantes han reducido las opciones que ofrecen, 800 Amp hasta 2500 Amp. Los interruptores para generadores cubren necesidades por arriba de los 10000 Amp, en alto voltaje, las soluciones se orientaron a corrientes nominales 2000 ó 3000 Amp.

### ***1.7.2 Descripción de distintos tipos de Interruptores***

El interruptor es un aparato esencialmente formado por contactos que se separan con importante velocidad para pasar rápidamente de condiciones de conducción a



aislación, y un mecanismo de comando con energía acumulada para lograr satisfacer las condiciones de movimiento.

El ambiente en el que se separan los contactos permite una clasificación y define una cantidad de tipos de interruptores.

En bajo voltaje.

- Aire Natural.
- Aire con cámaras de ión.
- Aire a deionización magnética (cámaras de cerámicas ó de metálicas - caída catódica).

En medio y alto voltaje

- Arco rotativo.
- Aceite, gran volumen.
- Interrupciones múltiples (en serie).
- Aire comprimido, soplado longitudinal, transversal con resistor de apertura de aceite, pequeño volumen (cámaras múltiples).
- Hexafluoruro de dos presiones (neumático).
- Hexafluoruro de simple presión, autosoplante.
- Hexafluoruro de arco rotativo vacío, con distintos materiales en los contactos, cámaras múltiples, resistores de maniobra.
- Hexafluoruro con aprovechamiento de la energía de arco seguramente en un futuro próximo, cámara de interrupción de estado sólido.

En su forma más simple un interruptor que trabaja con este principio de funcionamiento está constituido por un recipiente de material aislante como por

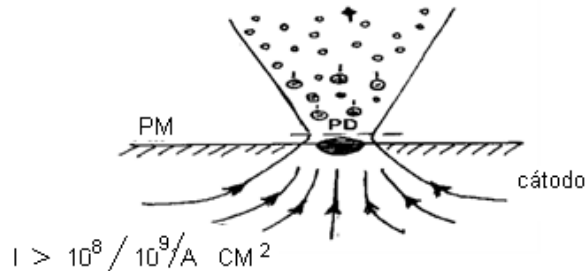
ejemplo porcelana o vidrio en este recipiente se encuentran montados los contactos fijos y móvil, el contacto móvil es controlado del exterior por medio de una varilla aislante que se apoya en un dispositivo especial que permite el movimiento. Si se supone que se quiere interrumpir una corriente alterna de un valor relativamente pequeño cuando un contacto se separa del otro que se encuentra potencial negativo se forma un mecanismo del tipo catódico que origina una pequeña descarga hacia el otro contacto que se encuentra a potencial positivo y emite iones positivos bajo la forma de vapor del electrodo del metal que constituye el electrodo mismo, este vapor se forma por efecto de la elevada temperatura en la superficie de la zona interesada del contacto.

Al primer paso de la corriente por su cero el arco se extingue de tal manera que la rigidez dieléctrica entre los contactos se restablece rápidamente dada la escasez de partículas conductoras.

El interruptor de potencia de vacío, se diferencia de esos interruptores, porque no requiere de un medio de extinción. En contraposición a los arcos de maniobra en aire, SF<sub>6</sub> o aceite, en el vacío falta la materia ionizable necesaria para la formación de una descarga térmica de gases.

Sin embargo, después de la apertura de los contactos atravesados por una corriente, en el vacío se genera un arco de vapor metálico, al cual para abreviar, de ahora en adelante llamaremos arco en vacío. El arco en vacío genera por sí mismo, los portadores de carga necesarios para transmitir la corriente a través del vacío, mediante la vaporización del material de los contactos. Proceso de Interrupción en el Interruptor

GRAF. 23.  
PRESIÓN DEL VAPOR DEL MATERIAL DEL CÁTODO.



Al separarse los contactos recorridos por una corriente, se genera el arco en vacío debido a la fusión o vaporización explosiva del último punto de contacto, teniendo el arco en el primer momento, un solo pie en el electrodo negativo, la así llamada mancha catódica.

La mancha catódica es una pequeña y limitada región de alta temperatura y presión, desde la cual se emiten iones, electrones y partículas neutras. En la mancha rige una alta densidad de corriente ( $> 10^8 \text{ A/cm}^2$ ) como así también una temperatura superficial próxima a la de evaporación del material de los contactos.

Las regiones perimetrales de la mancha, representan una fuente intensiva de vapor metálico neutro, el cual es ionizado en el cono de descarga que se genera delante del cátodo. El transporte de la corriente, en un 90% de su valor total, se efectúa mediante electrones. Los iones positivos producen una neutralización de la carga neutra del ambiente motivada por los electrones.

Si la corriente de arco excede un valor límite, dependiendo del tipo de material de los contactos, este arco, el pie del arco ubicado en el cátodo se divide en dos o varias

manchas catódicas paralelas. Podemos tener diferentes formas de arcos en vacío que se diferencian según sean las formas de las mismas:

- ✓ Arco en vacío difuso
- ✓ Arco en vacío contraído en el ánodo y en el cátodo.
- ✓ Formación de la mancha anódica

Estas van a depender de la forma y el material de contacto. No existe un arco concentrado en los interruptores de potencia, al menos para corrientes en el entorno de la corriente nominal. Por ello, la erosión de los contactos durante la operación con corrientes hasta los valores de la corriente nominal, es despreciable.

➤ *Arco en vacío difuso.*- Tiene la siguiente característica, el único electrodo activo es el cátodo. Toda la superficie del ánodo forma una superficie de condensación para las partículas de vapor y los portadores de carga, actuando como un colector.

Si la corriente de arco excede un valor límite, dependiendo del tipo de material de los contactos, el pie del arco ubicado en el cátodo se divide en dos o varias manchas catódicas paralelas.

Sin la influencia de un campo magnético exterior, los pies de los diferentes arcos, se mueven a gran velocidad y en forma desordenada por la totalidad de la superficie catódica rechazándose mutuamente los puntos vecinos. De esta manera, generan permanentemente un nuevo vapor metálico.

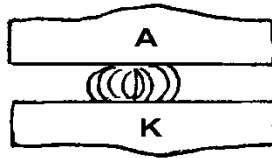
➤ *Arco en vacío contraído en el ánodo y cátodo.*- Se forma la descarga en el rango de las corrientes altas, el cual se genera con electrodos cilíndricos de cobre a partir de una intensidad de corriente de 10 kA. En el arco de vacío contraído, se trata

de un arco de vapor metálico de alta presión con caída de la tensión anódica y columna térmica, el cual se genera partiendo de los puntos difusos de las manchas anódicas y el agrupamiento de las manchas catódicas opuestas, formando así un único pie catódico. El ánodo, luego de esta sollicitación, presenta nítidas erosiones.

En los interruptores para altas corrientes de cortocircuito, la erosión de los contactos y el sobrecalentamiento localizado, se evitan mediante un movimiento forzado y constante de los pies de los arcos.

GRAF. 24.

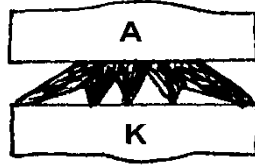
ARCO EN VACÍO CONTRAÍDO EN EL ÁNODO Y CÁTODO.



➤ *Formación de mancha anódica.*- El arco en vacío contraído se genera partiendo de lo difuso de las manchas anódicas y el agrupamiento de las manchas catódicas opuestas, formando así un único pie catódico. La mancha catódica, es una pequeña y limitada región de alta temperatura y presión, desde la cual se emiten iones, electrones y partículas neutras.

En la mancha rige una gran densidad de corriente ( $> 10^8$  A/cm<sup>2</sup>) como así también una temperatura superficial próxima a la evaporación del material de los contactos.

GRAF. 25.  
MANCHA ÁNODICA



El uso de interruptores en los circuitos de potencia es necesario ya que permiten manejar los equipos de una instalación contra cortocircuitos y sobrecargas y para realizar las operaciones de conmutación ordinarias.

En el momento que el equipo interrumpe la corriente se forma un arco eléctrico entre sus terminales, para evitar este arco, algunos interruptores son utilizados para proteger generadores y las secciones de las líneas de transmisiones, están sumergidos en un líquido o gas aislante como lo son los de maniobra en aire, SF6 o aceite.

### ***1.8 Bobina Tesla.***

La Bobina de Tesla es un generador electromagnético que produce altos voltajes de elevadas frecuencias (radiofrecuencias) con efectos observables como sorprendentes irradiaciones, coronas y arcos eléctricos.

#### ***1.8.1 Capacitor o Condensador***

Un capacitor está compuesto de dos placas metálicas separadas por un dieléctrico. Su función es almacenar cargas eléctricas. El material aislante que separa las placas se llama dieléctrico y generalmente se usa aire, vidrio, mica, etc.

### ***1.8.2 Capacidad Eléctrica***

Se define como la propiedad que tienen los capacitores de almacenar cargas eléctricas. La unidad fundamental de la capacidad es el farad o faradio (F); los submúltiplos de esta unidad son los microfaradios (millonésimos de farad), picofaradios, etc.

### ***1.8.3 Inductancia Eléctrica***

Se define como la propiedad de una bobina que consiste en la formación de un campo magnético y en el almacenamiento de energía electromagnética cuando circula por ella una corriente eléctrica, la unidad de la inductancia es el Henry (H).

### ***1.8.4 Frecuencia***

Es el número de oscilaciones o ciclos que ocurren en un segundo. La unidad fundamental de la frecuencia es el Hertz (Hz) y corresponde a un ciclo por segundo.

### ***1.8.5 Radiofrecuencia***

Se le llama radiofrecuencia a las corrientes alternas con frecuencias mayores de los 50,000 Hz.

### ***1.8.6 Frecuencia Natural***

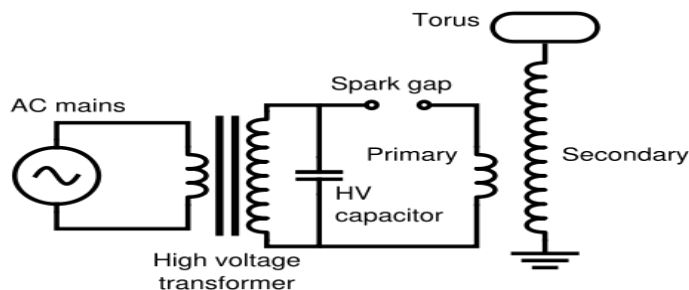
Todos los objetos elásticos oscilan cuando son excitados por una fuerza externa (una barra metálica al ser golpeada oscila, emitiendo un sonido característico). La

frecuencia a la que un objeto elástico oscila libremente es llamada su frecuencia natural de oscilación. Si a dicha barra oscilante acercamos otra barra idéntica, la segunda barra comenzará a oscilar a la misma frecuencia, excitada por la primera; porque la segunda barra habrá es resonado con la primera.

En el caso de las oscilaciones electromagnéticas, se presenta el mismo fenómeno que es justamente el hallazgo realizado por Tesla y aplicado a su bobina. Tesla construyó un circuito oscilador (un capacitor conectado en paralelo con una bobina) que llamó primario y a él acerco una bobina secundaria cuya frecuencia natural de oscilación fuese la misma que la del circuito primario; de la relación de vueltas entre el primario y el secundario depende el voltaje obtenido.

La Bobina de Tesla causa gran impresión por su espectacularidad y provoca interés por conocer su funcionamiento; una excelente manera de comprenderla y disfrutarla resulta mediante la construcción de una bobina propia.

GRAF. 26.  
CIRCUITO DE BOBINA TESLA





## **CAPITULO II**

### **ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

#### ***2.1 Introducción***

En el presente capítulo, se procedió al análisis de datos obtenidos con los diferentes campos de profesionales y estudiantes de Ingeniería Eléctrica, se espera confirmar nuestra hipótesis de trabajo. Determinar la factibilidad de diseñar e implementar un modulo de un sistema que simula la descarga de gases, para pruebas de rigidez dieléctrica de interruptores de distribución, aplicando en el laboratorio de la “Universidad Técnica de Cotopaxi”.

En cualquier caso, se optó en la presente investigación en dedicar un solo capitulo al análisis e interpretación de resultados de modo general, en el transcurso del cual podrán observarse diferencias en lo que a resultados se trata.

El análisis e interpretación de datos del proyecto se aplicó con la ayuda de Microsoft Excel, la interpretación gráfica de los resultados y una mejor ilustración y explicación en el contenido del proyecto de tesis.

## ***2.2 Metodología Utilizada***

En el capítulo se describió el desarrollo del proyecto de tesis, por ende se procedió a utilizar el método analítico que se distinguen los elementos de un fenómeno y se procede a revisar ordenadamente cada uno de ellos por separado. La física, la química y la biología utilizan este método; a partir de la experimentación y el análisis de gran número de casos se establecen leyes universales. Consiste en la extracción de las partes de un todo, con el objeto de estudiarlas y examinarlas por separado.

Estas operaciones no existen independientes una de la otra; el análisis de un objeto se realiza a partir de la relación que existe entre los elementos que conforman dicho objeto como un todo; y a su vez, la síntesis se produce sobre la base de los resultados previos del análisis.

Para poder precisar el trabajo de obtención de datos, se decidió aplicar la técnica de investigación de campo, la cual nos permite estar en el lugar en que se desarrolla o producen los acontecimientos, en contacto directo con quien o quienes son los gestores del problema que se investiga. Aquí se obtiene la información de primera mano en forma directa, con la ayuda de la herramienta estadística llamada encuesta la cual fue aplicada a ELEPCO S.A. y a los estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, mediante el uso del cuestionario que se encuentra en el **ANEXO 1**, con esta información se contribuirá a obtener pautas e información de los problemas y necesidades que tienen los profesionales de dicha carrera en el área de la Distribución Eléctrica y buscar las posibles soluciones. Una vez que se tiene definido los datos con la aplicación de la escala de Likerten, la encuesta se procede a diseñarlos y representarlos gráficamente con la ayuda del programa Microsoft Excel de acuerdo con el proceso diseñado, obteniendo así la validación de la hipótesis planteada aplicando así las variables de dicho proyecto

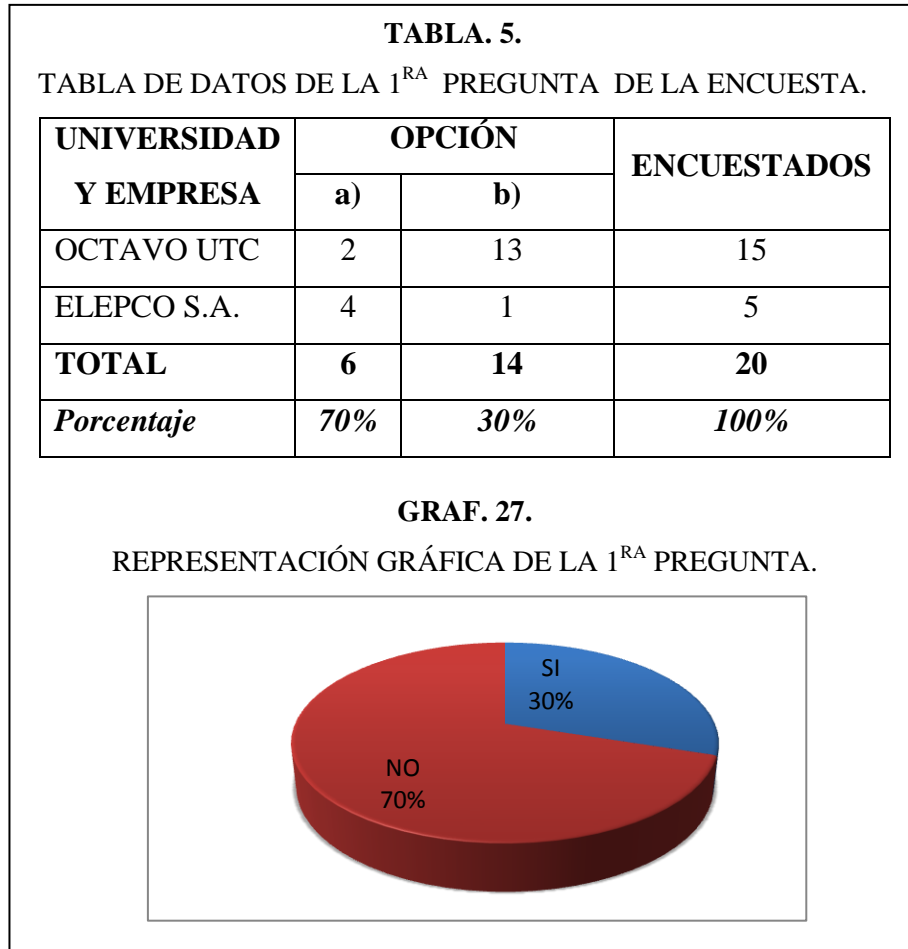
### ***2.2.1 Caracterización de la Universidad Técnica de Cotopaxi.***

La Universidad Técnica de Cotopaxi, se crea con la necesidad de contar con un centro de estudios superiores, con las cuales se pueda satisfacer las expectativas de la juventud estudiosa de nuestra Provincia. Actualmente dentro de su oferta académica se encuentra formando profesionales en distintas especialidades como en Ingenierías: Electromecánica, Eléctrica, Industrial y Sistemas y en Diseño Gráfico, etc. La U.T.C como centros de estudios superiores brinda profesionales de calidad a la sociedad, la misma que lleva implementada en su pensum académico procesos innovadores de estudio, inclusive posee convenios Inter-institucionales con algunas Universidades del extranjero con los cuales se ha obtenido un reconocimiento a la excelencia educativa. Se distingue de otras instituciones de educación superior de la Provincia por ser una Universidad alternativa vinculada al pueblo en todas sus actividades, donde se forman futuros líderes empresariales y haciendo realidad “LA VINCULACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CON EL PUEBLO”.

### ***2.3 Análisis e Interpretación de los resultados de la encuesta realizada a los estudiantes de octavo nivel de Ingeniería Eléctrica y trabajadores de la Empresa Eléctrica de Cotopaxi.***

**P1.** ¿Ha escuchado acerca de interruptores de alto voltaje y sus aplicaciones?.

a) Si            b) No



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

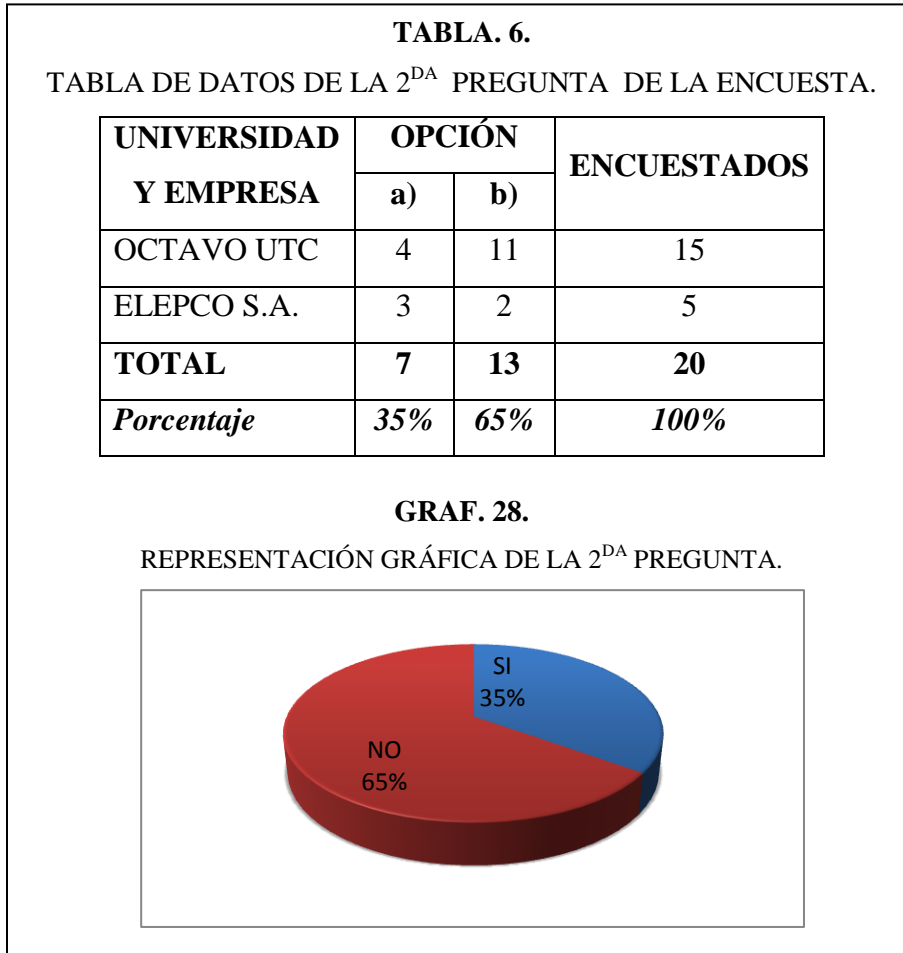
**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

### **ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 70%, conocen suficiente acerca de interruptores, ya que trabajan con estos dispositivos de media y alto voltaje, pero el 30% poco o nada, siendo la mayoría estudiantes que no tiene interés por desconocimiento, en tal motivo los profesores deberían incentivar a sus alumnos, para que sepan de interruptores de medio y alto voltaje.

**P2.** ¿Ha escuchado de los beneficios de los interruptores de distribución dentro de la subestación?.

- a) Si                      b) No



**FUENTE:** Encuesta Octubre 2011

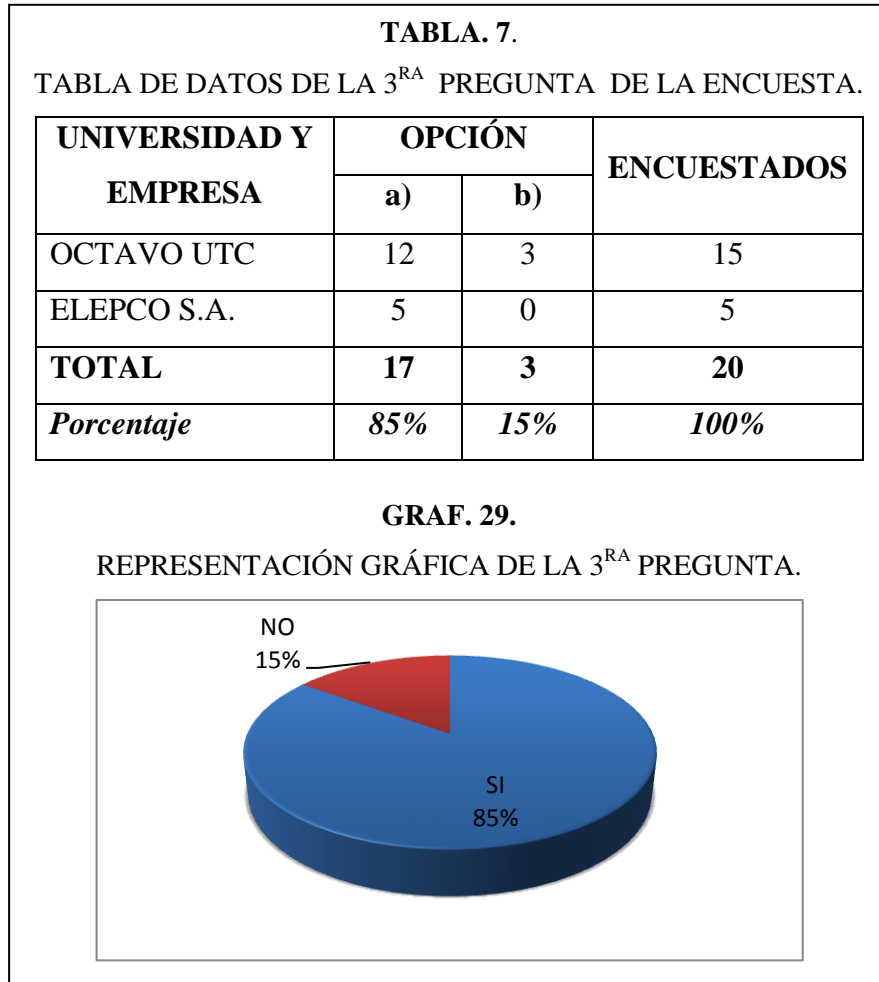
**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 35% si han escuchado de los beneficios de los interruptores de distribución dentro de la subestación, siendo la mayoría personas que trabajan con estos dispositivos y el 65% no han escuchado del tema manifestando, que no tienen idea de que son estos dispositivos o que nunca los han visto, tomando en cuenta que se deberá hacer clases demostrativas con estos dispositivos.

**P3.** ¿Usted conoce que función desempeña el interruptor de distribución?.

- a) Si                      b) No



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

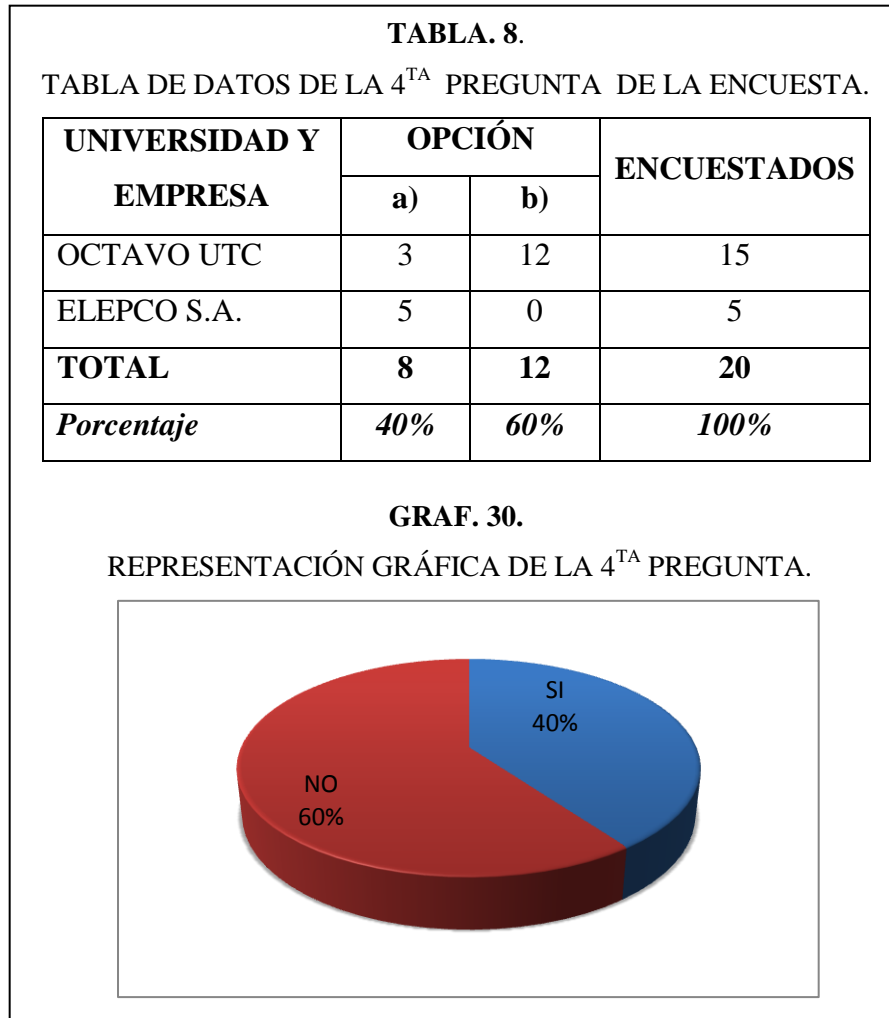
**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 85 % de los encuestados conoce que función desempeña el interruptor de distribución, posiblemente porque se habla de subestaciones de distribución alentando a la investigación, en tal motivo se deberá hablar tanto en los trabajos, como en clase de todos los elementos que tienen una subestación y para qué sirven para el otro 15 %.

**P4.** ¿Cree Ud. que las pruebas a interruptores de distribución son importantes?.

- a) Si                      b) No



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

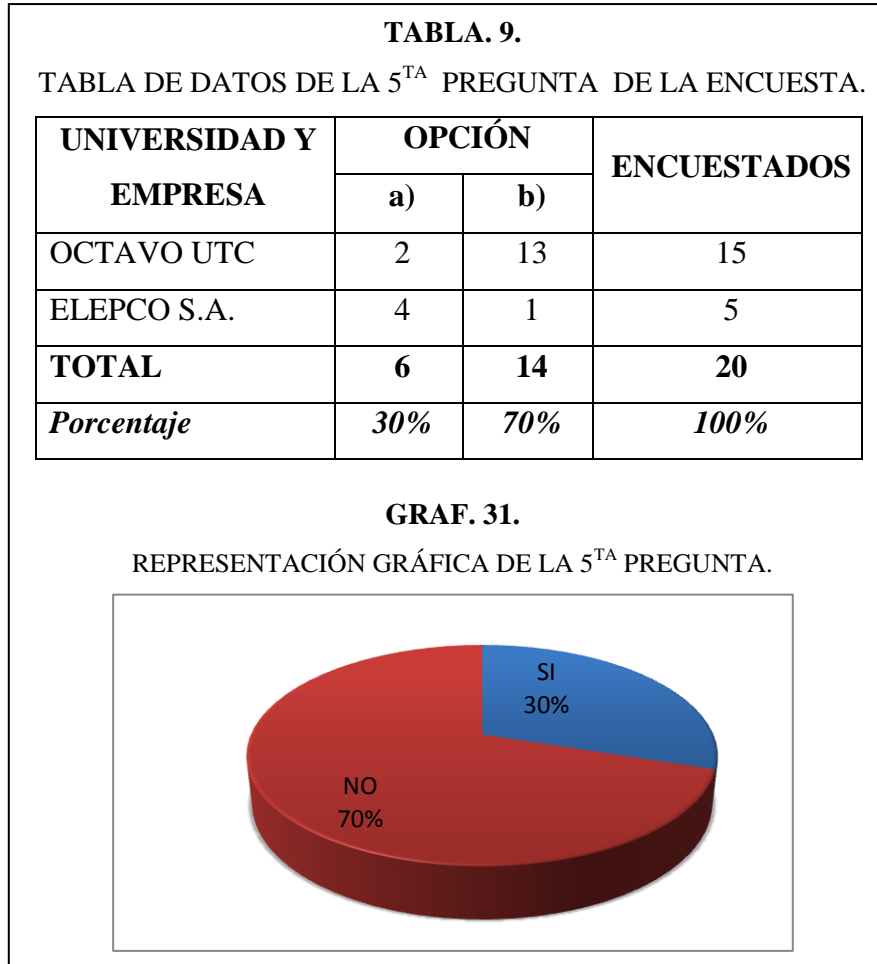
**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 60 % de los encuestados no conocen las pruebas a interruptores de distribución, porque nunca se hablaron de ellas, ni en el trabajo aun peor en la Universidad, dando como resultado un desconocimiento de más de la mitad de los encuestados, se debería buscar la forma de dar seminarios generales de este tema.

**P5.** ¿Ha escuchado de las pruebas de rutina aplicables a los interruptores?.

- a) Si                      b) No



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 70% de los encuestados estiman que nunca han escuchado sobre las pruebas de rutina aplicables a los interruptores, posiblemente porque no se habla mucho de este tema tanto a trabajadores de las empresas y a los estudiantes, en tal motivo el desconocimiento es general, por lo cual tanto para jefes como para profesores de debería hablar del tema muy ampliamente.



**P6.** ¿Conoce algún peligro al realizar las pruebas de rutina para rigidez dieléctrica?.

- a) Si                      b) No

**TABLA. 10.**  
TABLA DE DATOS DE LA 6<sup>TA</sup> PREGUNTA DE LA ENCUESTA.

UNIVERSIDAD Y EMPRESA	OPCIÓN		ENCUESTADOS
	a)	b)	
OCTAVO UTC	7	8	15
ELEPCO S.A.	5	0	5
<b>TOTAL</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>20</b>
<i>Porcentaje</i>	<i>60%</i>	<i>40%</i>	<i>100%</i>

**GRAF. 32.**  
REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA 6<sup>TA</sup> PREGUNTA.

**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

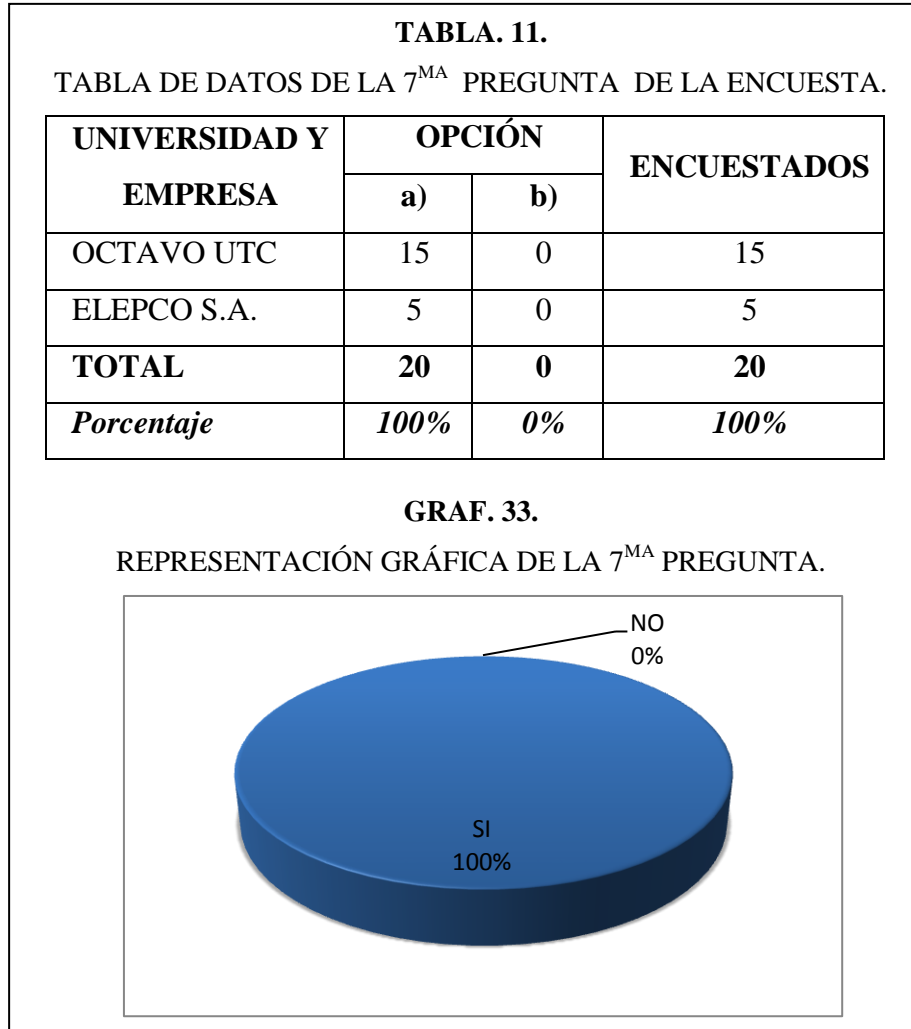
**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 60% de los encuestados estiman que existe peligro al realizar las pruebas de rutina para rigidez dieléctrica, porque empíricamente se sabe que toda clase de pruebas que implique en medio o alto voltaje, es muy peligroso mas no porque conozcan que se hace en estas pruebas, de tal manera se debe hablar de cómo se hacen estas pruebas.

**P7.** ¿Le gustaría conocer un módulo didáctico de prueba de rigidez dieléctrica para hacer descargas en el aire o vacío?.

- a) Si                      b) No



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

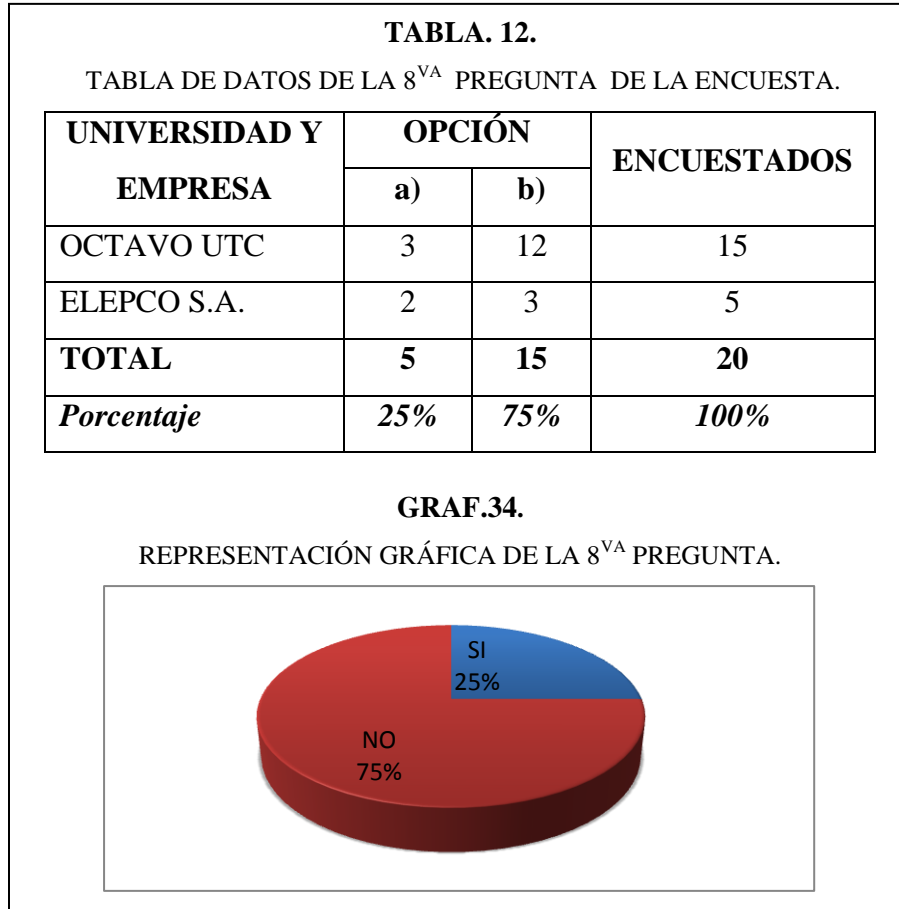
**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 100 % de los encuestados que es más que importante conocer un módulo didáctico, así tanto para las empresas eléctricas como en las Universidades, para entender cómo funciona practicar con este dispositivo y entender qué función cumplen en las subestaciones de distribución.

**P8.** ¿Ha escuchado de alguna vez cómo realizar las pruebas de rigidez dieléctrica en aire o en vacío en interruptores?.

- a) Si                      b) No



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

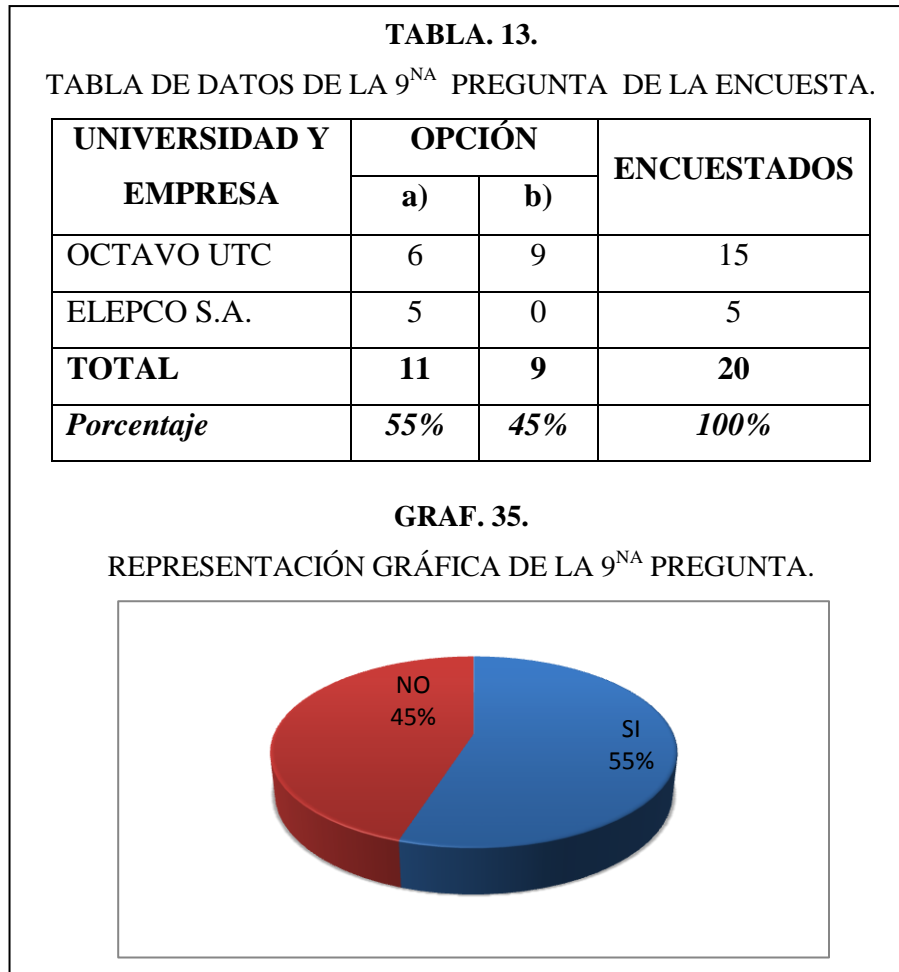
**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 75% de los encuestados estiman que jamás han escuchado cómo realizar las pruebas de rigidez dieléctrica en interruptores, posiblemente porque no se habla mucho de esos temas, a menos que trabajen diariamente con estos dispositivos en empresas y en Universidades porque los docentes tampoco saben del tema, entonces se deberá dar a los docentes algunas charlas de este tema.

**P9.** ¿Usted ha visto algún Arco Eléctrico?.

- a) Si                      b) No



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

**ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 55% de los encuestados estiman que si han visto algún arco eléctrico, posiblemente porque trabajan en redes de medio o de bajo voltaje, mientras que el 45% no lo ha visto porque es un fenómeno muy difícil de divisar y cuando ocurre se da por fallas en los sistemas eléctricos o corto circuitos.

**P10.** ¿Usted sabe para que se utiliza el vacío, en Interruptores de Distribución?.

- a) Si                      b) No

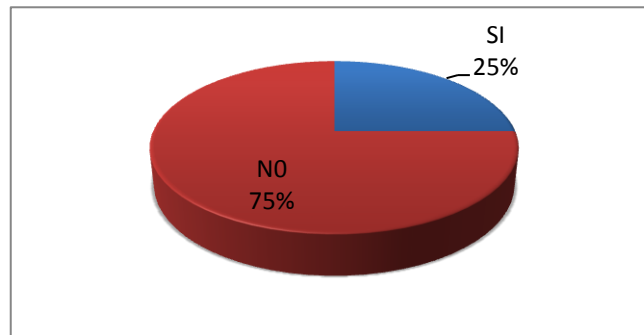
**TABLA. 14.**

TABLA DE DATOS DE LA 10<sup>MA</sup> PREGUNTA DE LA ENCUESTA.

UNIVERSIDAD Y EMPRESA	OPCIÓN		ENCUESTADOS
	a)	b)	
OCTAVO UTC	2	13	15
ELEPCO S.A.	3	2	5
<b>TOTAL</b>	<b>5</b>	<b>15</b>	<b>20</b>
<i>Porcentaje</i>	<i>25%</i>	<i>75%</i>	<i>100%</i>

**GRAF. 36.**

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA 10<sup>MA</sup> PREGUNTA.



**FUENTE:** Encuesta; Octubre 2011

**AUTOR:** Gabriela Medina, Abdón Vega.

### **ANÁLISIS:**

Los datos obtenidos indican que un 75 % de los encuestados estiman que no conocen, para que se utiliza el gas SF6 en Interruptores de Distribución, posiblemente porque no se conoce el dispositivo a fondo, aun peor, de los materiales que se utiliza en estos equipos para que funcionen, en tal motivo la estimación es que se hable de estos gases que no solo se utilizan como aislamiento en interruptores, sino en otros equipos eléctricos.

La interpretación de las preguntas de la encuesta se describe en el **ANEXO 1**

## ***2.4 Verificación de la Hipótesis.***

### ***2.4.1 Enunciado.***

Al diseñar e implementar un sistema que simula la descarga de gases en aire, para realizar en el laboratorio, para transformadores monofásicos y trifásicos hasta 15 Kv de la Universidad Técnica de Cotopaxi, el mismo podrá ser utilizado para realizar prácticas de interruptores de alto voltaje.

### ***2.4.2 Resultados de la verificación.***

Para la verificación de Hipótesis, se utilizó la técnica de investigación de campo y la herramienta estadística la encuesta, las cuales fueron de gran ayuda, para desarrollar la presente investigación. Además la población en este caso son los alumnos de la Universidad Técnica de Cotopaxi y los empleados de las Empresa Eléctrica de Cotopaxi S.A. en un número que se detalla a continuación:

**TABLA . 15.**  
TABLA DE POBLACIÓN Y MUESTRA.

<b>UNIVERSIDAD Y EMPRESA</b>	<b>POBLACIÓN</b>	<b>MUESTRA</b>
OCTAVO UTC	25	15
ELEPCO S.A.	10	5

Fuente: Investigación del grupo investigador.  
Elaboración: Grupo investigador.

Para llegar a tomar una decisión se utilizó la formulación de hipótesis estadística:

$$Z = \frac{(X_1 - X_2)}{\sqrt{\frac{(\sigma_1)^2}{n_1} + \frac{(\sigma_2)^2}{n_2}}}$$

$$Z = \frac{(10.3 - 9.7)}{\sqrt{\frac{(1.96)^2}{103} + \frac{(-1.96)^2}{97}}}$$

$$Z = \frac{0.6}{\sqrt{0.037 + 0.039}} = \frac{0.6}{0.28} = 2,17$$

Con un ensayo bilateral y al nivel de significación del 0,01 si Z se encuentra dentro del intervalo de -2,58 y + 2,58, se acepta la hipótesis planteada en la tesis.

### **2.4.3 Decisión.**

A través de los resultados que se obtuvo en los diferentes sectores donde se aplicó las encuestas, se puede concluir que la construcción de un sistema que simula la descarga de gases en aire, si es factible ya que servirá como módulo didáctico de prácticas, el cual los estudiantes podrán mejorar sus conocimientos en la manipulación de estos equipos, y aportaran de gran manera a los laboratorios de la Universidad, mejorando el nivel de preparación académica de los estudiantes, así como los docentes tendrán a su disposición una herramienta necesaria, al momento de impartir clases derivadas de esta rama.

Tomando en cuenta que la mayoría de encuestados, se manifestaron la falta de equipos, como interruptores en el lugar de estudio dificulta la adquisición de nociones

prácticas de los mismos, entonces la conclusión es que tenemos una gran deficiencia de conocimiento, acerca de esta tecnología y su correcta aplicación dentro del campo laboral, por lo cual el grupo investigador manifiesta, que la ejecución de este proyecto será de gran utilidad para los futuros profesionales.

## ***2.5 Conclusiones.***

- Al graficar los resultados de las encuestas, muestran una gran falta de conocimientos prácticos en el tema de los interruptores de distribución, los mismos que son base fundamental en la carrera de Ingeniería en Eléctrica.
- Al implementar un módulo de un sistema que simula la descarga de gases en aire, para realizar pruebas en el laboratorio de Banco de Pruebas, para transformadores monofásicos y trifásicos hasta 15 Kv, los estudiantes tendrán la facilidad de entender y manipular los procedimientos de los interruptores, para poder aplicarlos en sus actividades profesionales.
- Al diseñar y construir un sistema que simula la descarga de gases en aire, para realizar pruebas en el laboratorio con aislante en el vacío, se tomara de base las propuestas planteadas, para mejorar en completo su diseño, en beneficio de los estudiantes, ya que, se podrá utilizar como material didáctico.
- Para mejorar la propuesta planteada se evaluó correctamente los procesos y diseños del sistema, que se utilizara para la construcción y prueba del Interruptor de Distribución.



## ***2.6 Recomendaciones.***

- Es esencial utilizar una adecuada técnica de investigación al instante de ejecutar un estudio, de esto dependerán los resultados y el correcto control de la problemática diseñada y dar factibilidad a una solución posible.
  
- Se plantea que el auto desarrollo por parte de los profesionales diariamente, es necesario, sabiendo que todos los conocimientos no se adquiere dentro del aula de clase, además que la tecnología en interruptores de distribución en el ámbito eléctrico, es renovada constantemente.
  
- Se debería tener un mayor interés por parte de las autoridades, en cuanto al equipamiento de los laboratorios técnicos y buscar los medios necesarios para que el docente y sus alumnos, puedan desenvolverse correctamente en temas tan vitales.
  
- Formalizaran cronograma para la capacitación continua a los docentes, para que transmitan conocimientos actuales, de acuerdo a las necesidades sentidas en protecciones eléctricas para distribución, con lo cual se obtendrá profesionales de calidad, que cumplan con las expectativas requeridas por la sociedad, al plantear correctamente una encuesta podemos obtener datos precisos y reales de los requerimientos y necesidades, por lo cual las preguntas deberán ser objetivas para la recolección de datos y confirmación de resultados. Corresponde a todos los docentes y personal de la Universidad, despertar el interés a los estudiantes para la realización de investigaciones en los diferentes aspectos técnicos, de la carrera de Ingeniería Eléctrica, con lo cual se podrá desarrollar nuevas técnicas y conocimientos dentro del área profesional en la que se desenvuelvan.

## **CAPITULO III**

### **DESARROLLO DE LA PROPUESTA.**

#### ***3.1 Propuesta Factible.***

El presente capítulo trata sobre los procedimientos de adquisición, construcción, ubicación, funcionamiento de los equipos y materiales eléctricos, que fueron necesarios para la construcción, de un módulo didáctico para descargas en aire y vacío en aislante gaseoso en interruptores de distribución.

La construcción se realizó tomando en cuenta, las presentes necesidades de los estudiantes, tanto en el aspecto eléctrico y mecánico, tratando así de realizar prácticas con elementos funcionales y comúnmente utilizados en los Sistemas Eléctricos de Transmisión, con lo cual se podrá solucionar problemas de carácter técnicos.

#### ***3.2 Presentación.***

El proyecto de investigación está dirigido al correcto aprendizaje, centrado en la actividad del alumno, es así, que se aprecia una fuerte tendencia en la toma de conciencia, respecto a la necesidad de solucionar las carencias educativas y técnicas para garantizar la educación de calidad para todos que están la formación académica.

Este proyecto de tesis tendrá mucha importancia ya que permitirá a los alumnos de las especializaciones técnicas; realizar prácticas de laboratorio a su vez conocer las estrategias metodológicas, más adecuadas que se deben utilizar en el aprendizaje de pruebas de rigidez dieléctrica en el aislante y realizar secuencias con elementos reales, conociendo su correcto funcionamiento, dando como resultado la fácil de inquietudes y dudas que tenga el estudiante, las podrá superar fácilmente por que contara con el apoyo del docente, que tendrá a su disposición este módulo didáctico y podrá explicar de mejor manera su clase e interactuar entre la enseñanza, llevándolo a la práctica de manera sencilla.

El proyecto de tesis está enfocado hacia las necesidades que tienen los estudiantes y su vez se plantea una solución práctica, al diseñar y construir un dispositivo de pruebas rigidez dieléctrica con elementos utilizados comúnmente en la industria y que son de fácil montaje y desmontaje, de fácil manejo y con tecnología actual que harán del mismo un elemento útil para poder entender de manera más profunda y real la tecnología eléctrica.

Los fundamentos tecnológicos que constituyen esta investigación son aquellos referidos al desarrollo de los procesos de enseñanza y educación, con sus múltiples utilidades que el estudiante y docente puedan dar al proyecto de tesis, para un mejor aprendizaje, en el desarrollo de habilidades prácticas mediante las pruebas con elementos del módulo didáctico, la educación superior y especialmente en la especialidad de Eléctrica, asume la responsabilidad de formar profesionales que puedan desenvolverse en el área eléctrica, y en el orden social haciendo una búsqueda del conocimiento científico, expresable a través de teoría y práctica, utilizando una estrategia general reflexiva, intelectual y rigurosa, conducida por el método científico que se adquiere en la formación de los alumnos.

### ***3.3 Justificación***

La operación de este módulo didáctico permitirá el mejoramiento del proceso de pruebas de rigidez dieléctrica para los aislantes gaseosos de interruptores de distribución eléctrico.

Este módulo didáctico permitirá simular la descarga de aislantes gaseosos y el aporte del conocimiento claro y preciso, al realizar las prácticas de rigidez dieléctrica con los alumnos en el laboratorio, obteniendo satisfacción por parte de alumnos y docentes.

La aplicación de la prueba de rigidez dieléctrica para aislante gaseoso en interruptores de distribución con la utilización de laboratorio tendrá como resultado la Eficiencia, Eficacia y Efectividad del aprendizaje, lo cual será de gran ayuda para los estudiantes de la especialidad dando como resultado la calidad de profesionales que se desenvuelvan.

### ***3.4 Objetivos.***

#### ***3.4.1 Objetivo General.***

Operar un módulo didáctico para realizar descargas en el vacío y aplicar la prueba de rigidez dieléctrica, para aislante gaseoso de interruptores de distribución con la utilización del laboratorio.

### ***3.4.2 Objetivos Específicos.***

- Investigar los contenidos científicos que tienen relación con el módulo de la prueba de rigidez dieléctrica, para aislante gaseoso en interruptores de distribución.
- Elaborar y aplicar el modulo didáctico a través del Laboratorio para realizar las pruebas de aislante gaseoso en interruptores de distribución.
- Analizar los resultados en el módulo de descargas en aire y la aplicación de las pruebas de rigidez en el vacío, para realizar un cuadro comparativo de descargas en diferentes niveles de voltaje hasta 15 Kv.

### ***3.5 Alcance de la Investigación.***

En la presente investigación se propone la construcción de un módulo didáctico para realizar descargas en vacío, utilizando un recipiente de plástico acrílico, electrodos conformado tornillos de hierro, los cuales podrán determinar la posición de dos válvulas, para poder conectar un dispositivo que sirva para poner en el vacío a la cámara del recipiente, esto se logrará con una bomba que succionara el aire de la cámara, conectado a una bobina tesla que servirá como un elevador de voltaje, para producir altos voltajes.

Lo cual se contribuirá en la ampliación de módulos prácticos en los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi, debido a que no han podido ser equipados con este tipo de elementos, por la falta de presupuesto hacia los mismos.

El módulo contará con los equipos necesarios para el control y mando además de todos los accesorios indispensables para la ejecución de la práctica, para realizar pruebas en el módulo didáctico, entonces estos podrán servir al estudiante como guía

para futuras prácticas, que pueden ser circuitos sencillos, hasta otros de difícil complejidad, para adquirir nuevos conocimientos y destrezas. Al estructurar del módulo se diseñó en plástico acrílico por motivos ergonómicos, seguridad y de visibilidad, los accesorios a disposición tendrán toda la simbología necesaria para su correcta identificación, serán desmontables totalmente; por ende la ejecución de prácticas en el mismo será de fácil comprensión, para los estudiantes, demostrando así la factibilidad de ejecución de este proyecto.

### ***3.6 Marco Administrativo.***

A continuación se procedió a detallar los gastos inmersos en la ejecución del proyecto planteado, los mismos que han sido financiados totalmente por los postulantes en cuanto al desarrollo tanto de la tesis, la construcción del módulo didáctico y la adquisición de todos los accesorios a utilizarse, con lo cual se cumple el objetivo planteado anteriormente.

### ***3.7 Factibilidad.***

La propuesta es factible porque se verificó amplia información y se obtuvo la experiencia de los docentes, ya que, muchos de ellos ejercen su profesión en empresas eléctricas que utilizan los sistemas referentes al tema de investigación, por tal razón tienen el conocimiento en la manipulación de estos equipos. Mientras que los postulantes cuentan con las bases académicas necesarias para poder implementar el diseño, al momento de la ejecución del proyecto, en cuanto a los recursos económicos es financiado por los postulantes para su ejecución; con el firme propósito de que este proyecto sea un aporte beneficioso, para el desarrollo tecnológico de la Universidad y poder aportar con profesionales de calidad a la

sociedad. Para la utilización de este módulo, el equipo va contar parámetros para la puesta en funcionamiento y mantenimiento; y de ésta manera el estudiante tendrá la suficiente información para realizar las prácticas.

### ***3.8 Impacto.***

Mediante de este proyecto, se dará un aporte importante para los laboratorios de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, en especial para el área de Eléctrica, por lo que tiene una gran acogida por parte de los docentes y estudiantes, quienes describirán con equipos de alta tecnología en diferentes mediciones, para que sirva realizar varias prácticas, en los cuales podrán comprobar los conocimientos teóricos adquiridos en el aula de clase.

El presente proyecto, utilizará determinadas normativas de la vida útil de interruptores para aislantes gaseosos para crear un módulo didáctico, mejorando los conocimientos en los estudiantes de la carrera de Ingeniera Eléctrica, despertando un gran interés, ya que amplía el conocimiento teórico-práctico en las personas que lo realizan, al igual que en los estudiantes que realizarán prácticas sobre el manejo de arcos eléctricos, en diferentes voltajes en el módulo didáctico.

### ***3.9 Descripción de los Equipos a utilizar.***

Al diseño de ingeniería, se puede definir como “El proceso de aplicar las diversas técnicas y los principios científicos”, con el objetivo de alcanzar un fin y determinar un dispositivo o sistema de proceso con suficiente detalle, para permitir su correcto

funcionamiento. Lo cual a continuación se procederá a realizar el dimensionamiento de todos los equipos a utilizar en el módulo didáctico para descarga en aire.

Los elementos con sus respectivos accesorios que se utilizó en el proyecto de tesis se los adquirió en la Empresa Schneider de la ciudad de Quito, LG, GMC de la ciudad de Quito, G&G Galo García de la ciudad de Quito y General Cable Company de la ciudad de Quito, todo fue financiado totalmente por los postulantes.

### **3.9.1 Tablero de Mando**

Dentro del tablero de mando se tendrá los siguientes materiales:

- Una mesa de 1 metro de alto, tablero de 30\*20 cm. de superficie y el diámetro de 3,2 mm, que consta de las siguientes características.

**TABLA. 16.**  
CARACTERÍSTICAS DEL TABLERO DE MANDO.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Estructura metálica</b>	Fe.
<b>Superficie 30*20 cm.</b>	Fe y Acrílico
<b>Rieles Dinn 15 cm.</b>	Al
<b>Cable de cobre forrado de plástico N°14 AWG, flexible.</b>	1m, Cu.

Fuente: Grupo Investigador

- Un Circuito Termo-magnético de 60 Amp, de la marca SIEMENS que consta de las siguientes características.



**TABLA. 17.**  
CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO TERMO-MAGNETICO.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Type: CQD</b>	40°c
<b>Voltaje máx.</b>	480Y/277 Vac
<b>Polo Uní</b>	3
<b>Material</b>	Cu-Al

Fuente: [www.Schneider.com.ec](http://www.Schneider.com.ec)

- Un contactor monofásico de la marca SIENMENS, con su respectivo relay de protección de bobina, de 1-4 Amp, que consta de las siguientes características.

**TABLA. 18.**  
CARACTERÍSTICAS DEL CONTACTOR.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Contactor</b>	3 polos
<b>Bobina</b>	110V
<b>Frecuencia</b>	60Hz
<b>Capacidad</b>	32 Amp

Fuente: [www.unitech.com.ec](http://www.unitech.com.ec)

- Un pulsador doble, su función es actuar, en abrir y cerrar el circuito eléctrico, de marca CAMSCO de 110 Vac – 6A mp.

### **3.9.2 Mesa de pruebas de Equipo**

Dentro de la mesa de pruebas de equipo se tendrá los siguientes materiales:

**TABLA. 19.**  
**CARACTERÍSTICAS DE LA MESA DE PRUEBAS DE EQUIPO.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Estructura metálica 80 cm de alto, 38 cm de ancho y 90 cm de largo</b>	Fe.
<b>Superficie 43*123 cm y 2 cm de Ø.</b>	Madera.
<b>4 Tornillos de 5 mm*51 mm de largo con tuercas</b>	Acero.

Fuente: Grupo Investigador

### **3.9.3 Fuente**

- Un Transformador de Neón, Monofásico de 120 V, 30 mA y 1500 V de salida, marca FRANCEFORMER.

**TABLA. 20.**  
**CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Bobina Primario</b>	5625 espiras.
<b>Bobina Secundario</b>	703125 espiras.
<b>2 Tornillos de 9.2 mm*51 mm de largo con rodela y tuercas</b>	Acero.

Fuente: [www.franceformer.com](http://www.franceformer.com)

### 3.9.4 Módulo

➤ Una recipiente con tapa hermética de plástico acrílico de las siguientes medidas base 11 cm, altura de 10 cm y el ancho de 7 cm con el diámetro de material 4 mm, lo cual se puede apreciar en el plano del **ANEXO**, que consta de las siguientes características.

**TABLA. 21.**  
CARACTERÍSTICAS DEL RECIPIENTE DE PLÁSTICO ACRÍLICO.Ø

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Material</b>	Acrílico
<b>Bornes enroscable.</b>	Ø8 mm*15 mm
<b>Medidas recipiente</b>	11*10*07 cm
<b>Espesor del material</b>	4 mm
<b>Color</b>	Transparente
<b>Medida tapa hermética</b>	11*10*07 mm
<b>Orificio de la tapa.</b>	6 mm
<b>Diámetro del orificio laterales</b>	8 mm
<b>Temperatura ambiente</b>	-100 a +125°c
<b>Rango valides del voltaje</b>	±10%
<b>Peso</b>	500 gr

Fuente: Grupo Investigador.

➤ Unos empaques, separador y tuercas roscable que consta de las siguientes características.

**TABLA. 22.**  
 CARACTERÍSTICAS DEL EMPAQUE, SEPARADOR Y TUERCAS ROSCABLES.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Diámetro de empaque</b>	8 mm*1.2 mm
<b>Diámetro de tuerca rosca</b>	8,3 mm
<b>Separador cónico plástico</b>	Ø 7,5 mm*16 mm
<b>N. de posiciones.</b>	1
<b>Fluido.</b>	Aire
<b>Peso</b>	125 gr

Fuente: Grupo Investigador.

- Electrodo de hierro, para la formación del arco, de siguientes características.

**TABLA. 23. CARACTERÍSTICAS DEL ELECTRODO.**

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Diámetro del electrodo</b>	7 mm
<b>Largo de electrodo</b>	70 mm
<b>Peso</b>	10 gr
<b>Tipo de material</b>	Fe

Fuente: Grupo Investigador.

- Un manómetro de presión de 0 a 100 psi, de marca WIKA.
- Una válvula de presión marca DFG, para succión del aire del módulo.

### 3.9.5 Capacitor

Este dispositivo está compuesto por láminas de acetato, papel aluminio, tiras de madera esmaltada con las siguientes características:

**TABLA. 24.**  
CARACTERÍSTICAS DEL CAPACITOR.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Perímetro de papel aluminio</b>	15 cm*9 cm
<b>Perímetro de hoja de acetato</b>	14 cm*10.7 cm
<b>Tiras de madera</b>	2*1 cm*15 cm de largo.
<b>4 Tornillos con tuercas</b>	5 mm*51 mm de Acero.
<b>2 Tornillos con tuercas y rodela</b>	5 mm*13 mm de Acero.
<b>Barniz aislante.</b>	200 cm <sup>3</sup>

Fuente: Grupo Investigador.

### 3.9.6 Bobina Primaria

Este dispositivo está compuesto por un recipiente de PVC transparente, alambre de cobre sólido, terminal “U” con las siguientes características:

**TABLA. 25.**  
CARACTERÍSTICAS DE BOBINA PRIMARIA.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Medidas del recipiente cónico PVC capacidad de 1 litro</b>	d <sub>1</sub> = 119,8 mm * d <sub>2</sub> = 151,3 mm * h 150,1 mm

<b>Alambre de cobre solido</b>	10 AWG
<b>Terminales en U</b>	# 12-10 azul

Fuente: Grupo Investigador

### 3.9.7 Bobina Secundaria

Este dispositivo está compuesto por un aislante de pararrayo de 15 KV, papel aislante, cinta auto confúndete, alambre de cobre esmaltado calibre # 24 AWG, toroide las siguientes características:

**TABLA. 26.**  
CARACTERÍSTICAS DE BOBINA SECUNDARIA.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Área del pararrayo de 15 Kv cilíndrico.</b>	Ø= 51 mm*42 cm
<b>Papel aislante.</b>	1m
<b>Cinta auto confúndete.</b>	1 rollo
<b>Alambre de cobre esmaltado calibre 24 AWG.</b>	350m
<b>Toroide de acero inoxidable.</b>	12,7 cm*51 mm
<b>Tornillo con rodela de presión.</b>	8 mm*13 mm de Acero.
<b>Tornillo con tuerca.</b>	3 mm*25,4 de Acero.
<b>Grapa.</b>	9,4 mm*25,4 de Acero.

Fuente: Grupo Investigador

### 3.9.8 Conexión a Tierra

Esta conexión está compuesta por jaula de Faraday de hierro y Cable Flexible de 5 hilos calibre 6 AWG.

**TABLA. 27.**  
CARACTERÍSTICAS DE CONEXIÓN A TIERRA.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>Perímetro de la jaula de faraday de hierro</b>	40cm*38cm h=70cm
<b>Varillas de jaula de faraday</b>	Ø= 6,2 mm
<b>Cable flexible de 5 hilos</b>	6 AWG, Cu
<b>Lagarto de alta voltaje</b>	Cu.

Fuente: Grupo Investigador.

### 3.9.9 Varios Materiales

Todos los materiales que se utilizaron para ensamblar el equipo y proceder a hacer pruebas.

**TABLA. 28.**  
CARACTERÍSTICAS DE VARIOS MATERIALES.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>DATOS</b>
<b>6 Pedazos de ángulo de aluminio</b>	2.5 *2.5*12.5 cm de largo
<b>12 Tornillos con rodela y</b>	5 mm*3,8 cm de Acero.

<b>tuercas.</b>	
<b>Base de madera prensada</b>	20*14*9 cm de altura
<b>3 m de cable triplex de Cu</b>	# 10 AGW
<b>16 m alambre de cobre forrado de plástico.</b>	# 10 AGW
<b>Bornera 6 mm</b>	20 Entradas, # 8 AWG.
<b>Enchufe # 14</b>	15 Amp.

Fuente: Grupo Investigador

### ***3.9.10 Procedimiento de construcción y Montaje.***

De acuerdo a lo planteado, se procederá a buscar los materiales para realizar esta prueba de descarga en aire, se ha formado con un esquema que incluya criterios ergonómicos y estéticos, de tal manera que responda funcionalmente a los objetivos trazados.

El diseño de la estructura del equipo se realizó tomando en cuenta las medidas de cada uno de los elementos por medio de un software libre que se encuentra en internet, en forma de página web, que sirve para realizar el análisis matemático del sistema, para lo cual en los **ANEXOS** se muestra un plano que contiene sus respectivas dimensiones, el plano en el que consta el diagrama eléctrico y algunas fotografías del software en mención:

- Primero se tomó en consideración el tamaño de la bobina, y el lugar en donde se va a colocar, antes de construirla.
- Después se escogió un transformador de fuente de alimentación que determinara cuán grande puede ser la bobina de Tesla. En este caso se optó por adquirir un



transformador de neón que tiene un voltaje de salida de 15000 volts con una corriente de 30 miliamperes.

**GRAF. 37.**

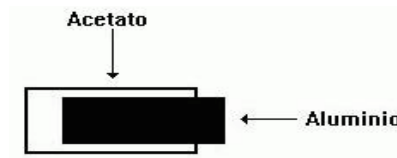
TRANSFORMADOR DE UN LETRERO DE NEÓN.



➤ Para crear el capacitor se necesitó dos placas metálicas separadas por un dieléctrico, se cortan 22 hojas de acetato en rectángulos iguales de 14 x 10,7 cm. Se cortan 33 rectángulos de papel aluminio de 9 x 15 cm. Se colocan dos rectángulos de acetato y encima de estos un rectángulo de papel aluminio, este último se coloca de manera que sobresalga 4 cm por el lado más corto del acetato.

**GRAF. 38.**

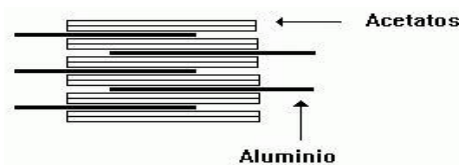
FORMA DE CAPACITOR.



Se repiten el paso anterior hasta acabar con las hojas, para proceder a comprimir estos materiales se colocan dos tiras de madera por encima de todas las capas a 3 cm de los extremos de estas y las otras dos por debajo de las capas, se cortan las lámina de aluminio a la mitad y las partes resultantes se doblan a la mitad.

Estos sirven como pasador para mantener unidas las placas de papel aluminio de cada extremo a 1.5 cm de cada extremo de las tiras se les hace un orificio de 5 mm, de manera que los orificios coincidan. Se colocan los tornillos de 5 mm \* 25,4 mm y 13 mm, en los orificios y se colocan las tuercas enroscándolas ligeramente.

**GRAF. 39.**  
COLOCACION DE CAPACITOR.



Al ángulo de aluminio se le hacen dos orificios de 5 mm, con una separación de 7 cm. Se hacen otros dos orificios del lado no perforado para fijarlo a la base con cuatro tornillos. Se toma el capacitor, se quitan dos tuercas de dos de los extremos de las tiras de madera y se meten los tornillos en los ángulos de aluminio, procurando apretar el capacitor para que no se desbarate. Se enroscan las tuercas fuertemente. El capacitor debe quedar sujeto al ángulo.

**GRAF. 40.**  
CAPACITOR.



➤ Para la construcción del módulo se eligió de material plástico de acrílico de 4mm, por ser un material, liviano de fácil transportación y más resistente a la corrosión que nos garantizará durabilidad y estética en el módulo, el montaje de materiales en el recipiente de plástico acrílico internamente y externamente se realiza con debida precaución, con el único objetivo que queden acoplados en forma correcta en el centro del recipiente los electrodos, perforando la paredes laterales 4 cm de alto y diámetro de 9 mm del módulo, al momento de insertar los electrodos y que tenga una regulación estable utilizando empaques y tuercas para hermetizar el volumen del equipo, utilizando una tapa hermética que contiene una válvula de succión conectado a una bomba manual de succión y un manómetro de medida de presión. Se incorpora a los extremos del módulo 4 ángulos de aluminio para soportar altas presiones. Al final se sujeta la con dos Ángulos de aluminio, haciendo dos orificios en cada ángulo de 5 mm, con una separación de 7 cm para fijarlo a la base con cuatro tornillos.

**GRAF. 41.**  
MODULO



➤ Al Construir la bobina inductora primaria se realiza con cable de cobre N° 10 AWG, se enrolla el alambre en forma de espiral. El núcleo alrededor del cual se enrolla el cable debe ser cónico de PVC. La longitud del alambre determina la inductancia de la bobina primaria. Esta debe tener una inductancia baja y se va a utilizar comparativamente poco cable para hacerla.

➤ Al Construir la bobina secundaria deberá tener la misma frecuencia de resonancia que la bobina primaria para que la bobina de Tesla opere eficientemente. Sin embargo, la bobina secundaria tiene que ser más alta y larga que la primaria, porque tiene una mayor inductancia, así como para prevenir cualquier descarga eléctrica desde el circuito secundario, que puede alcanzar a quemar el circuito primario y se encuentra a 2 cm de la parte superior del aislante de pararrayo de 15 KV, se enrolla papel aislante y en el otro extremo se deja 5 cm para hacer un orificio donde sale el alambre para la conexión a tierra, con el alambre de cobre esmaltado N° 24, se bobina el pararrayo haciendo 650 espiras del extremo inferior al superior, dejando 20 cm de alambre esmaltado de cada extremo para hacer las respectivas conexiones.

Luego se utiliza la cinta auto confundente para sujetar el bobinado en los extremos del pararrayo a demás en el extremo superior se lija unos cuatro cm del cable para hacer la conexión al capacitor secundario. Tanto el bobinado primario como el secundario están sujetos a la base por un bloque de madera con 2 ángulos de aluminio y tornillos.

➤ El capacitor secundario, o terminal de descarga, es de forma esférica y está en la parte superior de la bobina secundaria conectados entre sí por 8 espiras.

➤ El circuito secundario deberá estar aterrado, para evitar un flujo de corriente eléctrica que vaya desde la bobina de Tesla a la tierra de otros circuitos, lo que posiblemente quemaría todo lo que esté conectado en los enchufes.

➤ Para hacer la Conexión a tierra se hace una Jaula de Faraday de 40 cm\*38 cm, h= 70 cm y con diámetro de varilla 6,2 mm, se acopla con una grapa a la jaula con el cable flexible de 5 hilos #6 AWG, Cu que va a tierra con un lagarto de alta tensión.

➤ Se ensambla los componentes colocando los circuitos primario y secundario uno al lado del otro y se conecta la fuente de alimentación al circuito primario a través de

una bornera; Una vez que se haya instalado todos los dispositivos en un circuito cerrado, la fuente se conecta mediante un tablero de mando.

### ***3.10 Pruebas y Resultados.***

Se realizaron varias pruebas obteniendo datos tomados de mediciones hechas con el equipo, presentamos a continuación los datos y sus respectivos gráficos:

**TABLA. 29.**

RESULTADO DE MEDICIONES DE PRUEBAS EN AIRE.

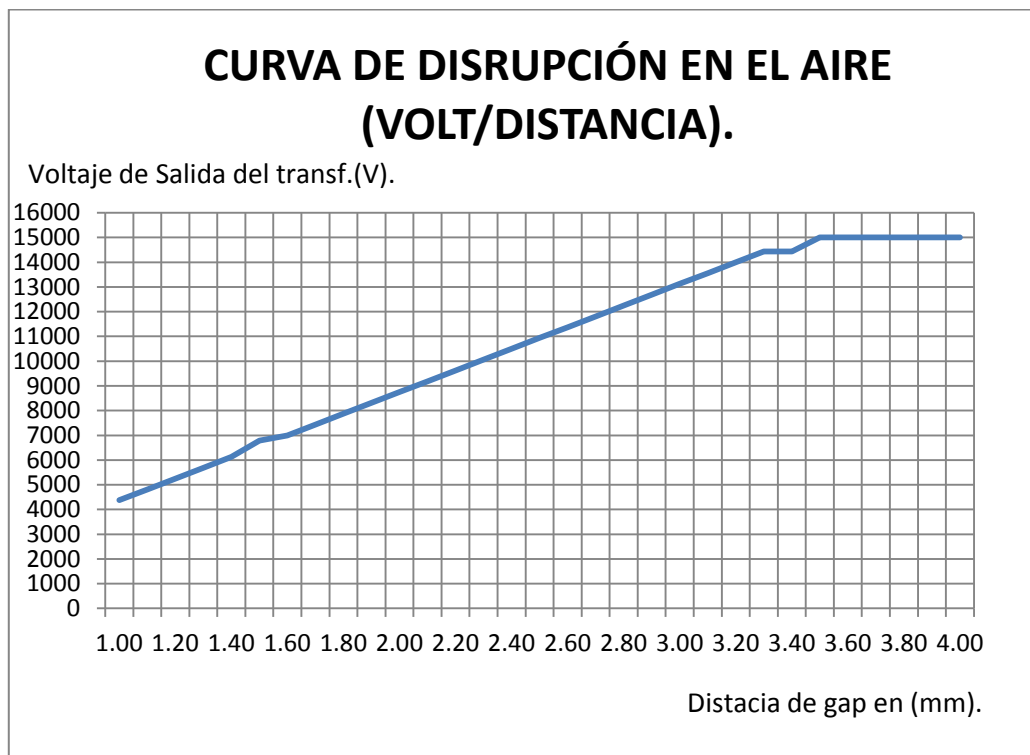
Distancia de gap en (mm)	I. de Entrada (A)	Voltaje de Entrada (V)	Voltaje de Salida del trans.(kV)
1.00	1.80	35.00	4375.00
1.10	1.98	38.50	4812.50
1.20	2.16	42.00	5250.00
1.30	2.34	45.50	5687.50
1.40	2.52	49.00	6125.00
1.55	2.79	54.25	6781.25
1.60	2.88	56.00	7000.00
1.70	3.06	59.50	7437.50
1.80	3.24	63.00	7875.00
1.90	3.42	66.50	8312.50
2.00	3.60	70.00	8750.00
2.10	3.78	73.50	9187.50
2.20	3.96	77.00	9625.00
2.30	4.14	80.50	10062.50
2.40	4.32	84.00	10500.00
2.50	4.50	87.50	10937.50
2.60	4.68	91.00	11375.00
2.70	4.86	94.50	11812.50
2.80	5.04	98.00	12250.00
2.90	5.22	101.50	12687.50
3.00	5.40	105.00	13125.00

3.10	5.58	108.50	13562.50
3.20	5.76	112.00	14000.00
3.30	5.94	115.50	14437.50
3.40	6.12	115.50	14437.50
3.50	6.30	120.00	15000.00
3.60	6.48	120.00	15000.00
3.70	6.66	120.00	15000.00
3.80	6.84	120.00	15000.00
3.90	7.02	120.00	15000.00
4.00	7.20	120.00	15000.00

Fuente: Grupo Investigador.

**GRAF. 42.**

CURVA DE DISRUPCIÓN EN EL AIRE (VOLT/DISTANCIA).



## **Análisis e Interpretación de Resultados**

Los resultados obtenidos en las pruebas de descarga en gases realizadas con el módulo didáctico nos muestra, que con voltajes adecuados en el explosor se crea una corriente constante dando como resultado un arco eléctrico visible, que depende del trayecto de los electrones en los electrodos, encontrando que el voltaje de ruptura es proporcional a la distancia de los electrodos, como se muestra en el gráfico 40. Además se observó, para distancias mayores a cuatro milímetros ya no existe el arco eléctrico indicando que el voltaje que crea la ruptura deberá ser mayor a 15 Kv.

Al trabajar con el circuito de bobina Tesla se observó y verificó que existen varios fenómenos como el efecto corona que se originan cuando la bobina primaria induce una alta tensión en la bobina secundaria descargando por el toroide arcos voltaicos con radio frecuencias.

Al igual que el voltaje la corriente de entrada del circuito es proporcional a la distancia del explosor, pero la corriente que es producida entre los electrodos debe ser constante para que exista un arco eléctrico.

## **CONCLUSIONES.**

➤ Mientras se realizó las pruebas se obtuvo un resultado esperado, comprobando la ley de Paschen, que dice que el voltaje y la corriente de ruptura permanece inalteradas, dando un principio de similitud que se nota en el circuito, para hacer funcionar la bobina primaria y secundaria en donde la corriente entra por el explosor y sale por la misma.

- Se comprobó que el voltaje que entra en el explosor es proporcional al tiempo que utiliza la descarga, para salir del mismo, ya que el voltaje crece el tiempo aumenta.
  
- El diseño de un sistema que simula la descarga de gases, basado en el principio de funcionamiento de un interruptor, se realizó de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación, utilizando normas internacionales de Altos Voltajes y materiales que sean didácticos, para ser manejarlo fácilmente y los mismos que pueden ejecutar cualquier práctica requerida.
  
- Para la relación de espiras en el circuito de la bobina tesla se utilizó un software gratuito, que realiza operaciones básicas eléctricas especializadas en estos tipos de proyectos y también se tomo datos calculados para realizar matemáticamente la relación.
  
- Para hacer la Jaula de Faraday se tomó en cuenta las normas Inen para circuitos eléctricos, en Instalaciones Industriales a demás se para poner en funcionamiento el circuito se deba dar mayores seguridades para las pruebas.
  
- Al realizar las protecciones en el circuito se realizo a base de la placa de datos del transformador de Neón conectándoles primero un circuito termomagnetico de 60 Amp, al contactor monofásico de 110 V, con respectiva protección, manipulando con un interruptor normalmente Abierto y Cerrado, logrando el control del circuito cuando los valores de amperaje sean mayores a 4 Amp.
  
- Se utilizó un variat, para poder hacer pruebas, utilizando varios voltajes como fuente y se observa, que desde 90 V hasta los 120 V, como el voltaje máximo que indica el transformador, se observo que existió disrupción en el explosor.



- Al utilizar el variator a un rango menor de 90 V, se comienza a escuchar un ruido en el capacitor, comprobando que el efecto corona se origina en circuitos que simulan altos voltajes.
- Se hizo pruebas destructivas de presión con la cámara del explosor, este recipiente tiene un manómetro de control, obteniendo como resultado que no se debe exceder de 30 PSI, al exceder esta medida de presión existe una explosión rompiendo la tapa de la cámara, por tal motivo no se procedió a hacer pruebas en aire a varias presiones.
- Para realizar el experimento de descarga con una lámpara fluorescente se deberá mantener una distancia de 4 mm al toroide, para que exista descarga por medio de ella y así se ilumina la lámpara y se debe realizar con debidas precauciones.
- Se comprobó todas las leyes de disrupción en gases cuando se hizo la descarga en aire a través del circuito observando los arcos eléctricos en una temperatura de 20°C y una presión atmosférica de 1.500 m, alrededor de 1 hPa cada 15 m.

## **RECOMENDACIONES**

- Para hacer pruebas en el sistema, sobre este proyecto se deberá tener conocimiento, acerca del tema y los dispositivos de protección en subestaciones que utilizan en las Empresas Eléctricas como protección de equipos y de personas.
- Se debería dar apertura por parte de las autoridades de la Universidad para que faciliten el espacio adecuado, para el correcto funcionamiento de laboratorio de la carrera de Ingeniería Eléctrica, además de que exista la capacitación para las personas encargadas.

- Se debe tomar en cuenta, para manipular el equipo se debe tener debidas precauciones, luego de realizar la prueba descarga, por que el capacitores dispositivo almacenamiento, lo cual se debe realizar descargas a tierra, para manipular con mayor seguridad.
- Para realizar el experimento de descarga con una lámpara fluorescente se deberá tomar en consideración la distancia de seguridad y equipo de potencia personal.
- Se deberá dar mantenimiento el equipo del sistema de descarga comenzando desde circuito de mando y bobina tesla, por lo que se pueda corroer por los alambres o romper los dispositivos del circuito.
- Para la seguridad del equipo se utiliza un variat que gradualmente va subiendo el voltaje a un nivel adecuado he indicado para realizar las pruebas de descarga eléctrica en el aire.
- Se deberá manejar el equipo con la guía del manual, leyendo las normas de seguridad indicadas en el instructivo respetando la señalización que se encuentra en el equipo.
- Tomar en cuenta la tabla de resultados que se obtuvo de las pruebas, para la distancia de electrodos y voltaje para futuras pruebas, a referencia de disrupción.
- Para futuras pruebas se tendrá que analizar el circuito eléctrico del equipo de forma matemática mas no practica ya que en toda la investigación se hizo pruebas con software utilizando medidas del equipo.

# BIBLIOGRAFÍAS

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

- AYORA G. Paul. **Descargas eléctricas en Altos Voltajes**, Escuela Politécnica Nacional- Biblioteca de Ingeniería Eléctrica.2006
- Feynman, R. y Leighton, R.B. (1987). **Física Vol. II**: Electromagnetismo y materia. Addison-Wesley Iberoamericana, cop.ISBN 0-201-06622-X.
- FRINK Donal G., **Manual Práctico de Electricidad para Ingenieros**, Escuela Politécnica Nacional- Biblioteca de Ingeniería Eléctrica.2010.
- HAWLEY R. **The Electrical Propeties of High Vacuum**. High Voltage Tecnologi, S IV, Oxford University Press.2005.
- LITVINOV, E.A., **Theory of Explosive Electron Emission**, 11<sup>th</sup> International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berlin 1984, IEEE EI-20 No. 6, pp. 683. August 2000.
- OPYDO, W. **Standard technical for High Voltage Testing**, IEEE, EscuelaPolitécnicaNacional. 2000.
- PASCHEN, F. **WiedemannAnnalen**, Editorial edición Universitaria, 1889, Pág. 37 al 69.
- ROTH A. **Técnica de Alta Tensión**, Biblioteca de Ingeniería Eléctrica- Escuela Politécnica Nacional. 2000, Pág.297 al 306.
- Sears, Francis W., Zemansky, Mark W., Young, Hugh D. (2004). **Física Universitaria vol. 2 (Electricidad y Magnetismo)**. Editorial Pearson Educación; Madrid (España). ISBN 970-26-0512-1.

## **BIBLIOGRAFÍA VIRTUAL**

- <http://biblioteca.epn.edu.ec>
- <http://deepfriedneon.com/teslaframeg.html>
- <http://desacargaselectricasennitrogeno.tesis.epn.edu.ec>
- <http://efectocorna.tesis.epn.edu.ec>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/nicolatesla#mv-head.](http://es.wikipedia.org/wiki/nicolatesla#mv-head)