

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica



**Evaluación del Riesgo de Falla Debido a las
Sobretensiones de Maniobra en los Aislamientos
de las Líneas de Transmisión
Aéreas a Altas Tensiones**

T E S I S

Para Optar el Título Profesional de

INGENIERO ELECTRICISTA

ALBERTO SALVADOR ZEGARRA UCEDA

Promoción 1983 - 2

L I M A - P E R U

1986

A mi padre:

Salvador Zegarra S.

INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	
CAPITULO I: EL AISLAMIENTO EN UNA LINEA DE TRANSMISION AEREA	5
1.1 Definiciones y Clasificación	9
1.2 Asignación del Aislamiento a Masa de los conductores en las Líneas de Trans misión Aéreas	10
1.3 Comportamiento de Aislamiento	21
1.3.1 Comportamiento de una Brecha de Aire	23
1.3.2 Comportamiento de una Cadena de Aisladores de Suspensión	35
CAPITULO II: EL SOSTENIMIENTO ELECTRICO DEL AISLAMIENTO	43
2.1 Definición	44
2.2 Factores que afectan el Sostenimiento Eléctrico	44
2.2.1 Influencia de las Condiciones Atmosféricas	45
2.2.2 Influencia de la Forma de Onda	61
2.2.3 Influencia de los Parámetros Geo métricos	67
CAPITULO III: EL ESFUERZO ELECTRICO SOBRE EL AISLAMIENTO	71

	Pág.
3.1 Sobretensiones de Maniobra	74
3.2 Función Voltaje - Tiempo de las Sobretensiones por Maniobra	75
3.2.1 Definiciones Básicas sobre Ondas Impulsionales de Maniobra	77
CAPITULO IV: CONSIDERACIONES PROBABILISTICAS PARA LA EVALUACION DEL RIESGO DE FALLA	81
4.1 Probabilidad de Aparición de Sobretensiones de Maniobra	85
4.2 Probabilidad de Sostenimiento del Aislamiento	87
4.2.1 Probabilidad de Disrupción de dos Brechas en Paralelo	95
4.2.2 Probabilidad de Disrupción para Brechas Múltiples en Paralelo	
4.2.3 Distribución de Sostenimiento sin Atenuación	98
4.2.4 Métodos de Pruebas de Contorneo	103
4.3 Probabilidad de Fallas en las Líneas Eléctricas	106
CAPITULO V: EVALUACION DEL RIESGO DE FALLA, BAJO CONDICIONES DE PARAMETROS STANDARD IEC	111
5.1 Método Computacional para la Evaluación del Riesgo de Falla	112

	Pág.
5.2 Método Aproximado para la Evaluación del Riesgo de Falla	114
5.3 Ejemplos de Aplicación	126
CONCLUSIONES	140
BIBLIOGRAFIA	143

INTRODUCCION

Las estructuras de transmisión de energía eléctrica tienen como finalidad transportar la energía en forma confiable y económica desde los centros de generación hasta los lugares de consumo. Existen dos maneras de hacer dicho transporte: En forma subterránea o aérea. La primera de ellas es excesivamente costosa por lo que solo se hace a nivel urbano.

La transmisión aérea de la energía requiere de estructuras de soporte para los conductores, la configuración geométrica de estas estructuras debe ser tal que el aislamiento de la línea se conserve en cualquier condición de operación.

La elección de la rigidez del aislamiento se hace, sin embargo con arreglo a un compromiso en virtud del cual el número de perturbaciones de servicio previsibles se mantengan dentro de un cierto mínimo y, al mismo tiempo, las instalaciones no lleguen a hacerse demasiado costosas; es decir se acepta en el diseño la eventualidad de fallas aún en los casos de bajas probabilidades de contingencias.

Con el fin de cuantificar las perturbaciones de servicio por falla en el aislamiento, sería preciso tomar en

consideración todas las causas de sobretensiones de alguna importancia que influyen en el funcionamiento del mismo (Fig. N°1).

Un factor decisivo que ha permitido la formulación matemática del funcionamiento del aislamiento de una línea de transmisión ha sido, el estudio de los procesos de sobretensión, realizado por numerosos investigadores en los últimos 20 años y que ha permitido tener un conocimiento completo y profundo sobre la generación de las distintas clases de sobretensiones, su propagación en redes e instalaciones, su influencia sobre los órganos de funcionamiento eléctrico y sobre el comportamiento de los materiales aislantes frente a los esfuerzos provocados por aquellas.

Con el advenimiento de las Altas Tensiones, los sobrevoltajes de maniobra comenzaron a ser determinantes en los diseños del aislamiento externo de las líneas de transmisión. Es por ello que el propósito de este trabajo es presentar un método de ingeniería para la evaluación del Riesgo de Falla en los aislamientos externos de las Líneas de Alta Tensión sometidos a este tipo de esfuerzos.

El método se basa en el reconocimiento de la conducta estadística de la tensión soportada por el aislamiento así como de las sollicitaciones debidas a las sobretensiones, las cuales deben ser descritas por sus distribuciones estadísticas respectivas. De forma simplificada, es-

Este método se ha realizado utilizando hipótesis sobre la forma de las curvas de probabilidad. La ventaja del método radica en poseer un sentido físico preciso ya que permite coordinar los niveles de seguridad en la red según las consecuencias de las fallas. Por otra parte, permite efectuar análisis de sensibilidad (por ejemplo, evaluar la influencia de un cambio en la severidad de las sobretensiones o de la tensión soportada del aislamiento sobre la probabilidad de falla) permitiendo tomar decisiones sobre una base racional.

Quedaría incompleta esta presentación si dejara de hacer mención a la persona del Ing. Justo Yanque M., profesor de nuestra Universidad y poseedor de un amplio conocimiento y experiencia en el campo de los sistemas eléctricos de Alta Tensión; y del Ing. Máximo Inoue Yamane, Jefe de la UPE-Trujillo de Electroperú S.A.; agradezco la acogida que me brindaron y su continua orientación, que han hecho posible concluir este trabajo.

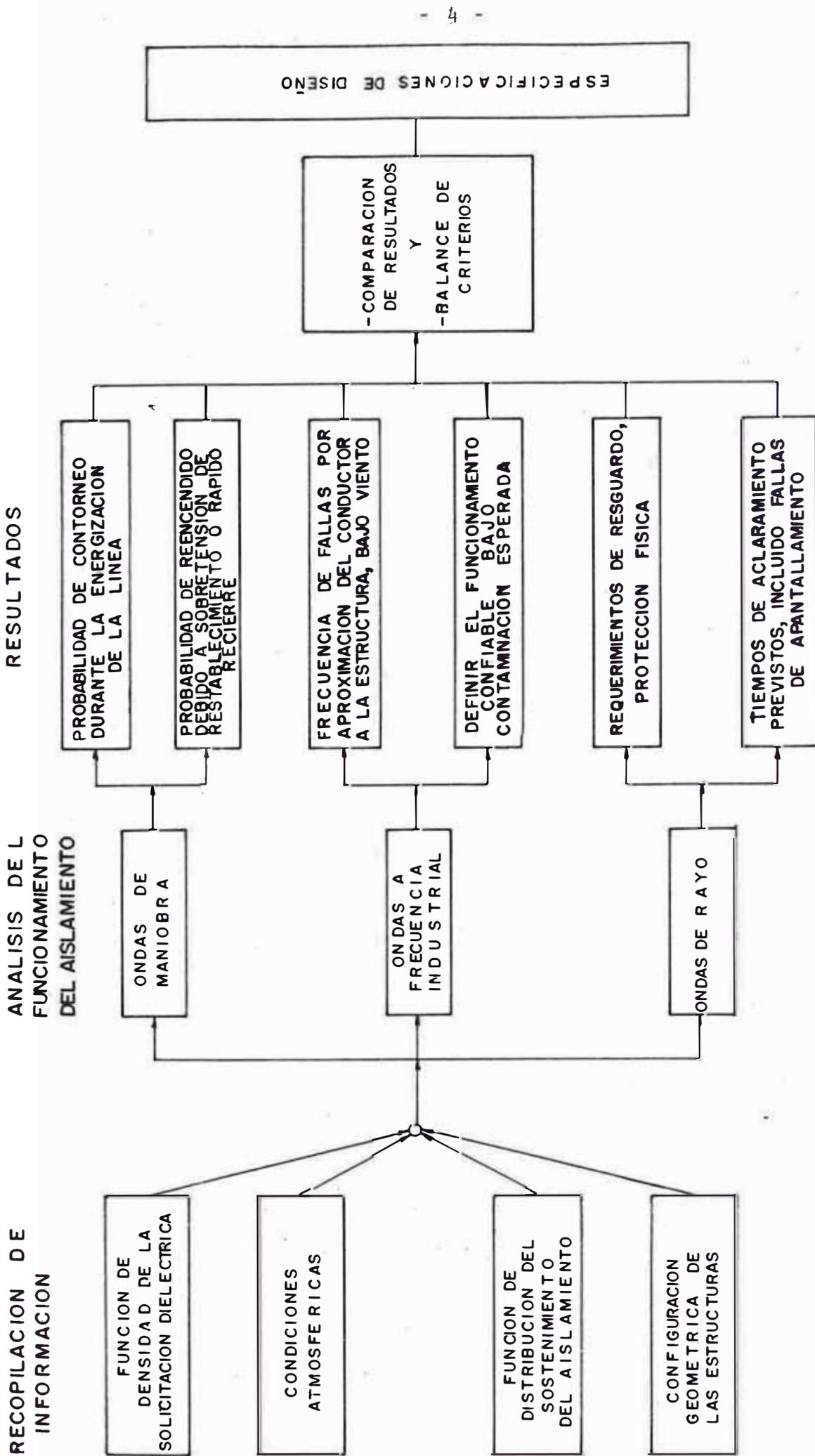


FIG. N° 1: ESTRUCTURA PARA UN ANALISIS COMPLETO DEL COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO

CAPITULO I
EL AISLAMIENTO EN UNA LÍNEA DE
TRANSMISION AEREA

Los conductores de una línea de transmisión son instalados a la intemperie, por lo tanto dependen del aire para su aislamiento; éste en las proximidades de la superficie terrestre está formado esencialmente por una mezcla de 71.8% en volumen de moléculas de nitrógeno, 20.9% de oxígeno, 0.9% de Argón, 0.03% de CO₂ y, en cantidades muy pequeñas, otros gases nobles, ácido carbónico y a veces ozono. Contiene por añadidura, agua en estado de vapor o niebla. A parte de las moléculas de dichas sustancias, se aprecia también la existencia de iones positivos y negativos de los gases antes mencionados, de electrones y radio-emanaciones. A la vez se encuentra en el aire de las zonas contaminantes: polvo natural, humos, vapores, productos químicos transportados por el viento como son, los fertilizantes agrícolas, residuos de cemento o fosfatos, sal de rocío proveniente de los mares, cenizas transportadas por el viento, residuos de carbón, álcali proveniente de las regiones desérticas, dióxido de azufre y vapores ácidos provenientes de plantas industriales; que al depositarse en la superficie de los aisladores forman la contaminación.

Los iones de uno u otro signo existen aproximadamente en el aire en la cantidad de unos 10^3 por cm^3 , predominando unas veces los positivos y otras veces los negativos. Los electrones aparecen en menos cantidad. La radioemanación se halla presente en la cifra de unos 3×10^{-17} g/cm^3 y finalmente existen iones pesados, los cuales, sin embargo, por razón de su escasa movilidad dentro de los campos eléctricos, no tiene gran importancia.

La concentración iónica del aire varía mucho de un punto geográfico a otro; en términos generales, la producción de iones puede efectuarse por procesos de choque, o bien como efecto de las radiaciones electromagnéticas y agitación térmica.

A los procesos de choque pertenecen las ionizaciones ocasionadas por el impulso de ciertos electrones rápidos, iones o moléculas neutras al colisionar contra moléculas también neutras.

Una fuente importante de ionización para el aire, la constituye la radioemanación (Ra Em) del grupo de los gases nobles, presente en el aire mismo. Constituye un producto de desintegración del radio, que se descompone constantemente en rayos α , Ra Em y electrones, al depositarse los últimos sobre las moléculas neutras, forman iones negativos; la Ra Em se disocia a su vez ionizando el medio circundante. La corteza terrestre radiactiva emite Ra Em y ésta se desprende junto con el aire que circula,

por los estrechos canales de la corteza indicada hacia las capas de la atmósfera.

Otra importante fuente de ionización la constituye el proceso fotoiónico consistente en la formación de iones por radiaciones electromagnéticas de pequeña longitud de onda, por ejemplo, la luz, los rayos γ

Los rayos γ procedentes de las sales radiactivas finalmente dispersas sobre la superficie terrestre, constituye una fuente de ionización.

Estos rayos no son sino oscilaciones electromagnéticas de onda muy corta (10^{-8} cm).

Como tercera fuente de ionización mencionaremos los rayos cósmicos.

Debido a ser extraordinariamente corta su longitud de onda, el efecto ionizante es muy intenso. Los rayos cósmicos son, a la vez muy penetrantes.

Es necesario tener presente, que a efectos de la concentración iónica de la atmósfera, de poca importancia es la ionización por choque, provocada por los rayos o las descargas de puntas sobre los árboles, las casas y las montañas.

Todavía cabe considerar la electrización provocada por el agua en su caída (electrización por frotamiento) y sobre la superficie de los mares; las gotas de agua resul

tan cargadas positivamente y el aire negativamente.

Según experiencias obtenidas en otras latitudes, el número de iones que por segundo y por centímetro cúbico, se forman sobre la tierra viene a ser 8.1 á 9 y sobre los océanos 4.3. Por lo tanto y desde el punto de vista macroscópico, la tierra puede ser considerada como un electrodo negativo cuyo potencial estimado sería de alrededor de 360 kV respecto a la ionósfera o capa superior de la atmósfera con carga iónica predominantemente positiva, denominada en la zona ecuatorial de mayor concentración, electrochorro ecuatorial, dicho cinturón iónico que encierra la mayor cantidad de líneas de corriente, que representan los 1800 amperios de intercambio casi constante a través del aire, corre transversalmente a la zona central del Perú.

Todas estas consideraciones deben tenerse en cuenta cuando se estudia el fenómeno de la conducción eléctrica en el aire, como aislamiento de una línea de transmisión y que está sometido a la acción de un campo eléctrico, ya que la corriente eléctrica equivale a un transporte de iones o electrones, y por consiguiente, solo será posible en tanto que el aire se encuentre ionizado.

La descarga es distinta en género e intensidad, según la forma y la magnitud de los campos eléctricos.

El aislamiento de las líneas de Alta Tensión por lo explicado anteriormente presenta una gran complejidad, que

ha sido motivo de exhaustivos estudios, tanto en la fase analítica como experimental, por diferentes laboratorios del mundo, habiéndose alcanzado niveles de conocimiento bastante aproximado en cuanto a su correlación e interdependencia de los factores decisivos que lo rigen.

1.1 Definiciones y Clasificación

Material aislante se define como: Materia cuya propiedad eléctrica fundamental es la capacidad de polarizarse y que se emplea para impedir el paso de corriente por vías indeseables para el trabajo del sistema eléctrico, en la que puede existir un campo electrostático.

El Comité Técnico N°28 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) da la siguiente clasificación para el aislamiento:

Aislamiento Externo

Son las distancias en el aire y las superficies de aislantes sólidos en contacto con la atmósfera que están sometidos a esfuerzo dieléctricos y a la influencia de condiciones atmosféricas u otros agentes externos, tales como contaminación, humedad, insectos, animales, etc.

Aislamiento Interno

Son las partes internas sólidas, líquidas o gaseosas del aislamiento de un material que están protegidas

de la influencia de las condiciones atmosféricas y de otros agentes externos, tales como contaminación, humedad, insectos, animales, etc.

Aislamiento Autoregenerable

Es el aislamiento que recupera sus propiedades aislantes, después de una descarga disruptiva producida durante un ensayo dieléctrico, un aislamiento de tal clase es generalmente (pero no necesariamente) un aislamiento externo.

Aislamiento No Autoregenerable

Es el aislamiento que pierde sus propiedades aislantes, o no las recupera totalmente, después de una descarga disruptiva producida durante un ensayo dieléctrico, un aislamiento de tal clase es generalmente (pero no necesariamente) un aislamiento interno.

1.2 Asignación del Aislamiento a Masa de los Conductores en las Líneas de Transmisión Aérea

Para examinar las distancias del conductor a la estructura (masa) se usa normalmente un diagrama de espacios (CLEARANCE DIAGRAM), dicho diagrama depende de la magnitud de la oscilación del conductor debido al viento y la brecha de aire requerida bajo condiciones de trabajo, las cuales pueden ser, la tensión o frecuencia industrial aplicada en forma continua o temporaria y las sobretensiones causadas por manobra o por rayo.

El espacio ideal para el aislamiento por rayo es mostrado en el figura N°2. La forma geométrica de este espacio puede ser entendido claramente mediante una revisión breve de la naturaleza de la disrupción inversa y el efecto del viento sobre el ángulo de la cadena de aisladores. Cuando el rayo choca en el cable de guarda, sobrecorrientes viajan en direcciones opuestas hacia los dos soportes cercanos. La posibilidad de un significativo ángulo debería ser considerado en estas dos estructuras, ya que los vientos durante las tormentas son de una magnitud considerable. Sin embargo, desde un punto de vista probabilístico, en las dos posiciones específicas y en el exacto instante del impacto del rayo la incidencia de una velocidad de viento suficiente para causar un significativo ángulo de desvío de la cadena es muy remota. Bajo estas consideraciones se tiene que las distancias eléctricas ideales por efecto de rayos no son sensibles a la acción del viento. Esto permite llegar a una geometría donde toda superficie de la torre sea aproximadamente equidistante del conductor. Esencialmente un círculo como muestra la figura N°2.

Para el caso de sobretensiones por maniobra el espacio eléctrico ideal no es circular como en el caso de rayos.

En este caso, si es influenciado significativamente por la oscilación de la cadena de aisladores.

Esto es debido principalmente al hecho que la sobre tensión. viaja mucha distancia antes de atenuarse significativamente. Por consiguiente, muchas torres son sometidas al esfuerzo eléctrico y cualquier torre con un ángulo debido al viento podría tener una disrupción. En 100 Km. de Línea, la probabilidad que una cadena de aisladores tenga un ángulo significativo debido al viento es grande. Este fenómeno conduce hacia una forma elíptica en el diagrama de distancias ideal (Fig. N°3). Los esfuerzos por rayo y sobretensión de maniobra pueden ser considerados esporádicos pero son severos para el aislamiento de la línea; pero en cambio los esfuerzos por ondas de frecuencia industrial no son de gran magnitud pero si de mayor tiempo, como se verá más adelante.

Condiciones extremas en la reducción del sostenimiento eléctrico suceden, básicamente bajo dos circunstancias:

La primera, es bajo ángulos extremos causados por tormentas razonablemente infrecuentes.

El segundo es, debido a la acumulación de contaminantes, unida con una alta humedad o condiciones de niebla

Un ángulo extremo de oscilación puede reducir la distancia de la brecha de aire, tal que la disrupción pueda ocurrir durante voltajes de operación normal.

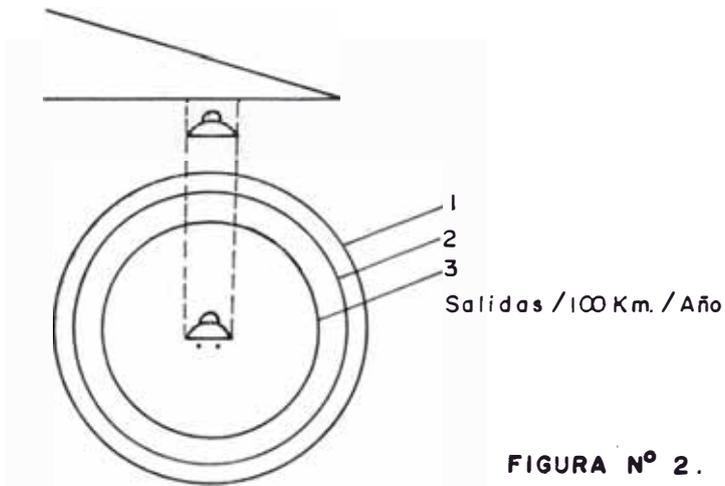


FIGURA N° 2. DIAGRAMA DE ESPACIO IDEAL PARA EL AISLAMIENTO POR RAYO

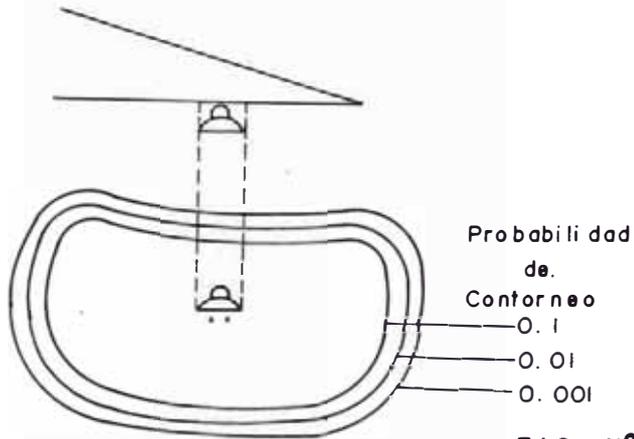


FIG. N° 3. DIAGRAMA DE ESPACIO IDEAL PARA EL AISLAMIENTO POR SOBRETENSION DE MANIOBRA

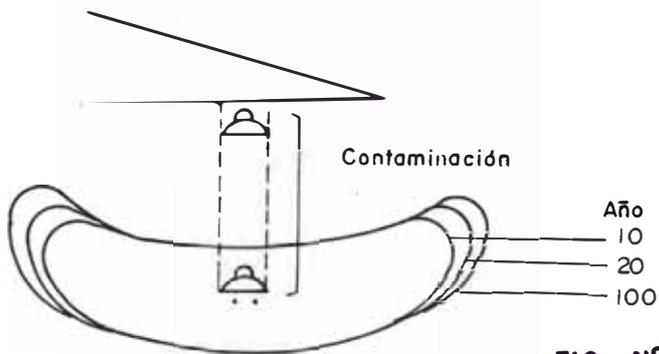


FIG. N° 4. DIAGRAMA DE ESPACIO IDEAL PARA EL AISLAMIENTO POR SOBRETENSION A FRECUENCIA INDUSTRIAL

Las velocidades de viento necesarias para causar disrupción a la frecuencia industrial existen durante tormentas severas de relativa larga duración.

La figura N°4, ilustra el espacio eléctrico ideal en este caso. Aunque la distancia necesaria para voltajes a la frecuencia industrial es mucho menor que para sobretensión por maniobra o por rayo, la distan-cia necesaria es muy sensible al ángulo de oscilación de la cadena debido al viento.

El funcionamiento del aislamiento de una línea cuyo recorrido incluye áreas industriales o costas marinas, es dependiente del funcionamiento de la cadena de aisladores contaminada.

Igualmente en áreas rurales el aislamiento de la línea puede ser reducido por varias sustancias químicas agrícolas. Es por ésto, que el espacio eléctrico ideal por funcionamiento bajo condiciones de contaminación es determinado por la geometría de la cadena de aisladores.

De la Coordinación de estos diagramas (Fig. N°5) se derivan las normas o recomendaciones para la asignación de aislamientos a masa de los conductores de las líneas de transmisión aéreas.

Se tiene, por ejemplo, que NGK INSULATORS, LTD., da los diagramas de espacios para torres de suspensión

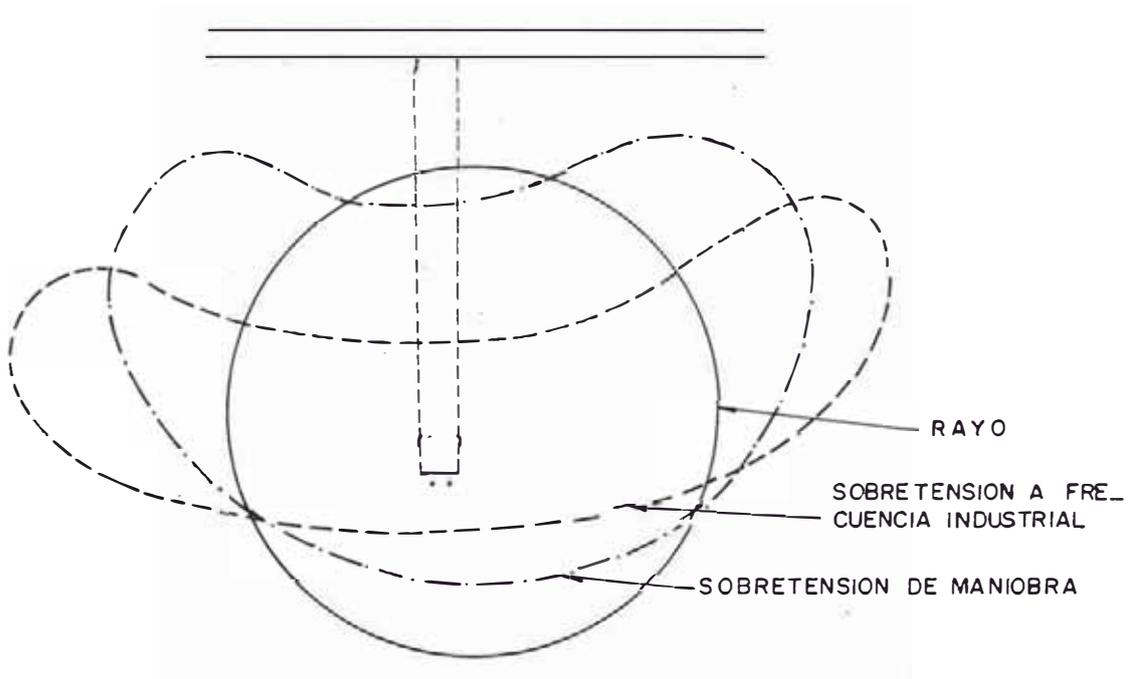


FIGURA N° 5 . COORDINACION DE DISTANCIAS DE BRECHAS DE AIRE

que se muestran en la figura N°6.1, para los cuales define las siguientes distancias:

- Brecha mínima de aire (minimun air gap)
- Brecha estándar de aire (standard air gap)

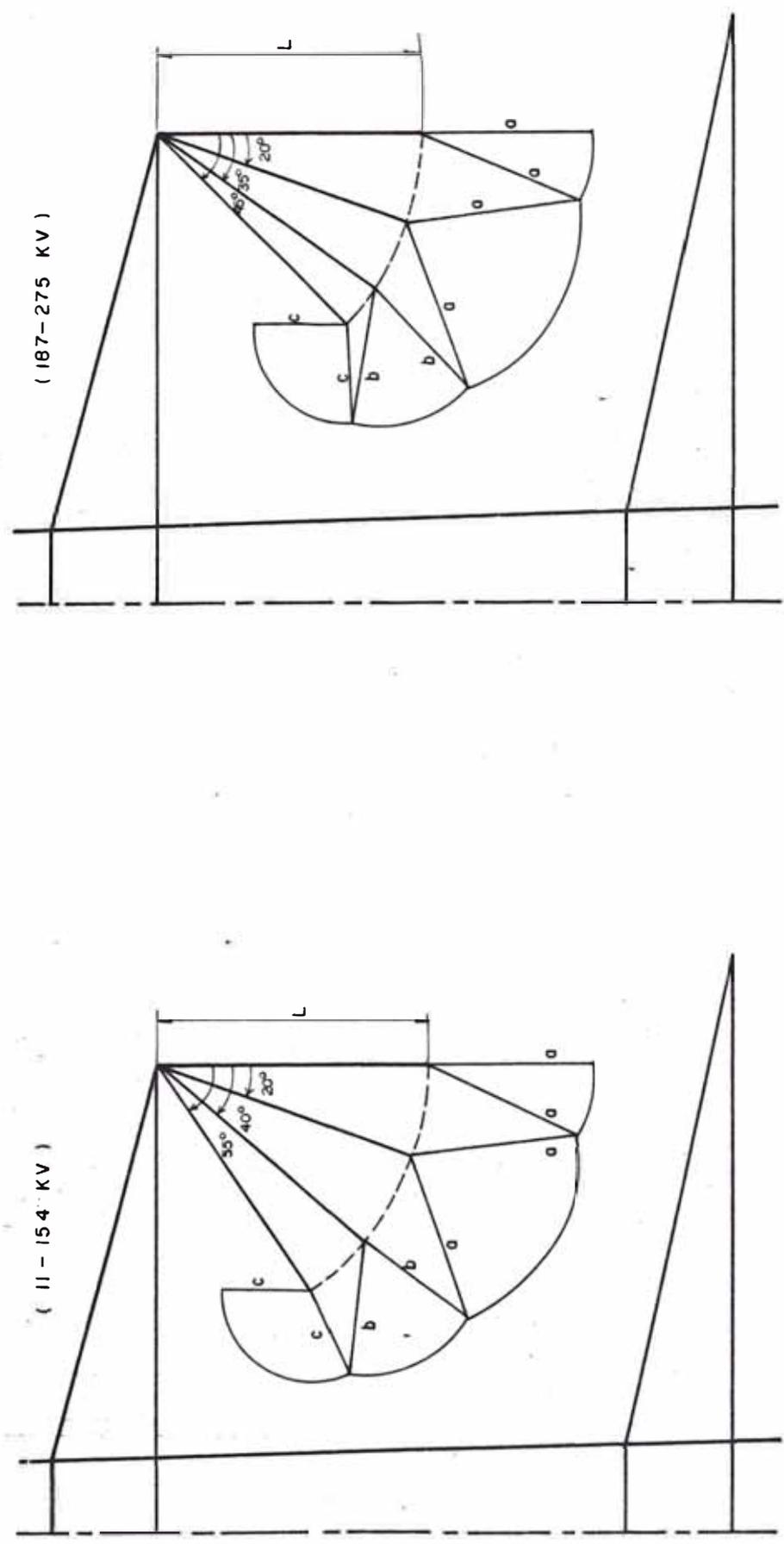
La brecha mínima de aire es la distancia conductor - torre bajo condiciones extremas de viento y que puede soportar los esfuerzos provocados por sobretensiones a frecuencia industrial.

Generalmente los valores mostrados en la Tabla N°1, son adoptados para esta distancia, los cuales como pueden verse dependen del voltaje del sistema y corresponden a las obtenidas mediante una configuración de electrodos de prueba tipo barra-barra.

TABLA N°1
MINIMA BRECHA DE AIRE

VOLTAGE NOMINAL DEL SISTEMA, kV	11	22	33	66	77	110	154	187	220	275
Mínima brecha de aire (m)	0.10	0.15	0.25	0.40	0.45	0.70	1.00	1.05	1.25	1.60

La brecha estándar de aire, es la distancia conductor-torre bajo condiciones de oscilación suave de la cadena y que sostiene hasta un impulso de voltaje, de amplitud pico V, que no ha producido contorneo en la cadena de aisladores.



- a : Brecha Standard de aire
- c : Brecha mínima de aire
- L : Longitud de la cadena de aisladores
- b : $\frac{a + c}{2}$

FIG. N° 6.1 DIAGRAMA DE ESPACIOS PARA TORRES DE SUSPENSION SEGUN NGK INSULATORS LTD /

Por su parte la REA (Rural Electrification Administration) confecciona el diagrama de espacio mostrado en la figura N°6.2, definiendo las siguientes distancias:

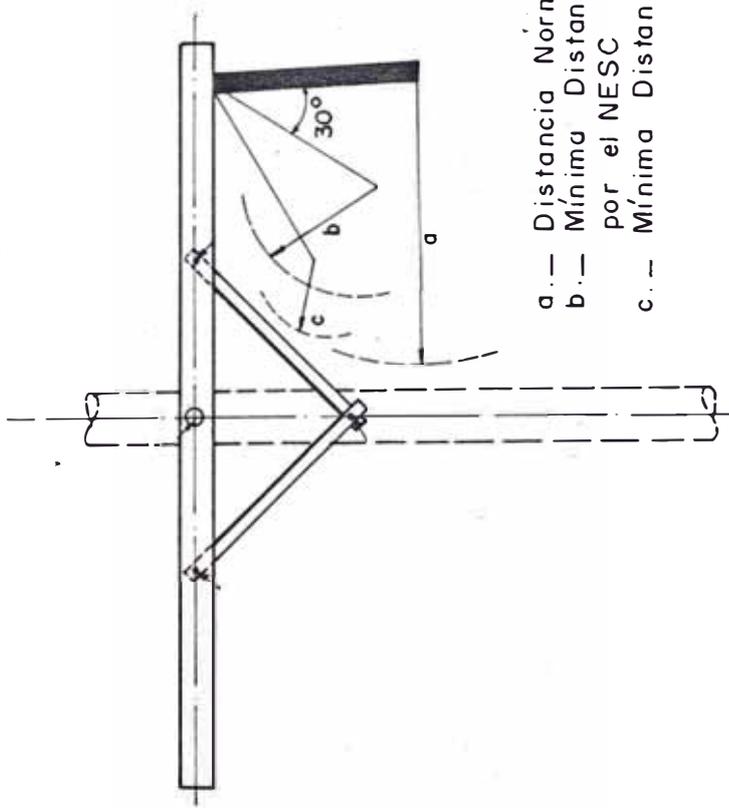
- Distancia normal al soporte
- Mínima distancia al soporte recomendada por el NESC
- Mínima distancia al soporte

Para la distancia normal al soporte se tiene en cuenta los largos períodos de operación, y en seco, es aproximadamente igual a la distancia del arco en los aisladores.

La mínima distancia al soporte recomendada por el NESC (National Electric Safety Code) se toma a 30° de ángulo de desvío de la cadena de aisladores, éste valor de ángulo figura en la sexta edición, ya que anteriormente se consideraba 45° .

Una consideración importante en la determinación de la distancia a la estructura, tomada en cuenta por el NESC, es que muchas veces la combinación de ángulo de viento y sobretensión de maniobra conduciría a una disrupción; asumiendo que el espacio es suficiente para sostener el voltaje de cresta a 60 Hz. con extremadas condiciones de viento. Por lo tanto, la distancia mínima al soporte se considera para las

FIG. N° 6.2 DIAGRAMA DE ESPACIOS PARA TORRES DE SUSPENSION SEGUN REA



- a. — Distancia Normal al soporte
- b. — Mínima Distancia al soporte recomendada por el NESC
- c. — Mínima Distancia al soporte

TABLA N°2

DISTANCIAS DE AISLAMIENTO DE AIRE SEGUN LA REA

VOLTAJE DE LINEA (kV)	AISLADORES DE SUSPENSION	N°Unid.	Peso (lb)	MINIMA DISTANCIA AL SOPORTE		MINIMA DISTANCIA NESC	DISTANCIA NORMAL AL SOPORTE	
				m	m			
34.5	3	38	1'-0"	0.305	0'-10"	0.254	1'-7"	0.483
46	3	38	1'-0"	0.305	1'-1"	0.33	1'-7"	0.483
69	4	48	1'-3"	0.381	1'-6"	0.457	2'-1"	0.635
115	7	78	2'-2"	0.66	2'-6"	0.762	3'-6"	1.067
138	8	88	2'-9"	0.838	3'-0"	0.914	4'-2"	1.27
161	10	108	3'-6"	1.07	3'-6"	1.07	5'-0"	1.524
230	12-14	138	5'-0"	1.524	4'-11"	1.5	6'-10"	2.083

peores condiciones de operación de los aisladores de suspensión, las cuales ocurren raramente y durante cortos períodos de tiempo. Estas distancias sostienen los sobrevoltajes de maniobra para la más baja temperatura y el viento transversal.

Se observa pues que, según las recomendaciones de la REA los sobrevoltajes de maniobra son de importancia principal en la determinación de los espacios de aire requeridos por las estructuras de soporte de la línea. Basado en las características de contorno de los aisladores, en las características de interrupción de las brechas de aire y para una probabilidad de sobretensiones bajo momentáneas condiciones de viento, dicho organismo recomienda las distancias mostradas en la Tabla N°2, de acuerdo al esquema de la figura N°6.2.

Así como éstas existen numerosas normas internacionales o particulares a cada país que reglamentan el cálculo de las distancias del conductor al soporte.

1.3 Comportamiento del Aislamiento

Los medios utilizados para el aislamiento de la línea de transmisión son: Aislantes Sólidos (porcelana, vidrio) y Aislantes Gaseosos (aire atmosférico); si los aislamientos son insuficientemente dimensionados, o si son sometidos a esfuerzos eléctricos que superan los valores previstos puede producirse una falla, que

se pone de manifiesto por la conducción de corriente a través del medio aislante, de modo que la descarga respectiva en el medio aislante presenta la característica de una perforación.

El arco eléctrico generado, desarrolla temperaturas muy elevadas que pueden producir alteración en la estructura molecular y aún atómica del medio circundante, en tal forma que, después de suspendido el pasaje de corriente hay que admitir el deterioro profundo del dieléctrico a lo largo del camino seguido por el arco; en el caso de aislantes sólidos la falla tiene carácter de permanente, mientras que en los gaseosos, debido al desplazamiento molecular y/o dispersión natural y recombinación en la zona afectada permiten recuperar las características dieléctricas originales haciendo que la falla tenga un carácter transitorio.

Por otro lado, cuando el medio aislante no es homogéneo, o está constituido por una asociación de diferentes aislantes, en razón de la diferente rigidez dieléctrica se produce una zona distorsionada siguiendo la superficie de contacto entre los aislantes de diferente naturaleza configurándose de esta manera "caminos" más exigidos. Por esta razón, la falla del dieléctrico se presenta "contorneando" la superficie de contacto de los aislantes constituyentes.

Los efectos antes mencionados aparecen al producirse una falla en el aislamiento de una línea de transmisión, el cual cumple con la condición de tener medios aislantes no homogéneos donde los materiales con los que se fabrican los aisladores presentan una rigidez dieléctrica mucho más alta que el aire atmosférico - (Tabla N°3), que es la condición básica para que ocurran los efectos superficiales; es por é~~l~~lo, que aparece el concepto de aislamiento externo, el cual para efectos de distanciamiento de la instalación, es la distancia geométrica axial; y la distancia total de línea de fuga del perfil geométrico, que representan la columna de aire con responsabilidad de aislar.

Para distinguir los dos tipos de descargas asociados a dichos distanciamientos, ~~clásicamente~~ se les ha denominado: Descarga Disruptiva (Disruptive Discharge) a la que se produce a través del aislamiento interno, y Descarga de Contorneo (Flashover), a la que se produce a través del perfil del aislamiento externo; sin embargo, en rigor solo existe una descarga de perforación siguiendo el camino dieléctricamente más exigido.

1.3.1 Comportamiento de una Brecha de Aire

El comportamiento con un impulso de tensión bruscamente ascendente y de rápida extinción posterior, depende fundamentalmente del tiem-

T A B L A N° 3

VALORES TÍPICOS DE RIGIDEZ DIELECTRICA

	PORCELANAS	AIRE
N G K	Convencionales en Europa y USA	
120 140	110 140	21.4

Rigidez Dieléctrica, KV/cm.
(Dielectric Strength)

po; ante todo, cuanto más empujado es el frente de la onda de tensión (generalmente expresado en kV/us) mayor es el valor al que ha de llegar para producir la descarga; los impulsos de amplitud insuficiente para provocar esta descarga durante el período frontal, pero capaces de originarla en la zona de cola, la producen tanto más pronto cuanto mayor es la amplitud en cuestión y más lento el descenso.

La disrupción de una brecha sujeta a un impulso de tensión no es un fenómeno instantáneo sino que requiere un cierto tiempo para desarrollarse, denominado retraso de descarga, y consta de dos períodos: uno de ellos de formación necesario como su nombre lo indica para el desarrollo de las condiciones propicias, contado hasta el momento en que se dispone de una cantidad inicial suficiente de electrones; constituye el tiempo mínimo de retraso de descarga bajo las sollicitaciones producidas por la tensión, es decir es el tiempo mínimo necesario para la disrupción T_0

El segundo período lo integra el tiempo de dispersión estadístico o tiempo probable T_a ; éste varía mucho aún en igualdad de condiciones y viene a ser el tiempo requerido para situar a los electrones iniciales en la posi-

ción crítica que conduce a la descarga.

El intervalo medio de este segundo período depende de la forma del campo en el cátodo y sobre todo de la forma del cátodo mismo, y del material de este electrodo; es decir de la energía precisa para la liberación de sus cargas, además del estado de la superficie, de la naturaleza e intensidad de las radiaciones de onda corta existente en sus inmediaciones; luego el tiempo de retraso de descarga T_B puede ser estimado como sigue:

$$T_B = T_o + T_a$$

El mecanismo de la interrupción en brechas de aire de gran distancia bajo condiciones de impulso de maniobra fue explicado por B. Hutzler y D. Hutzler (Electricite de France) de la siguiente manera; el proceso se inicia en una zona espacial en donde la densidad de carga interior provoca efluvios de efecto corona que se manifiestan con las transformaciones químicas del gas en el volumen en el que tiene lugar el efecto corona, consistiendo en lo fundamental, en que una parte del oxígeno O_2 que hay en el aire pasa a su forma modificada: Ozono O_3 , además se forman los óxidos de nitró

geno, sobre todo en presencia incluso de cantidad pequeña de humedad. El tiempo necesario para el inicio del efecto corona lo denominaremos como T_i a este período, al seguir aumentando la tensión, le puede o no seguir uno o varios períodos oscuros T_d , luego le siguen un tiempo necesario para la formación del camino iónizado al progresar el movimiento de la cabeza guía: T_e .

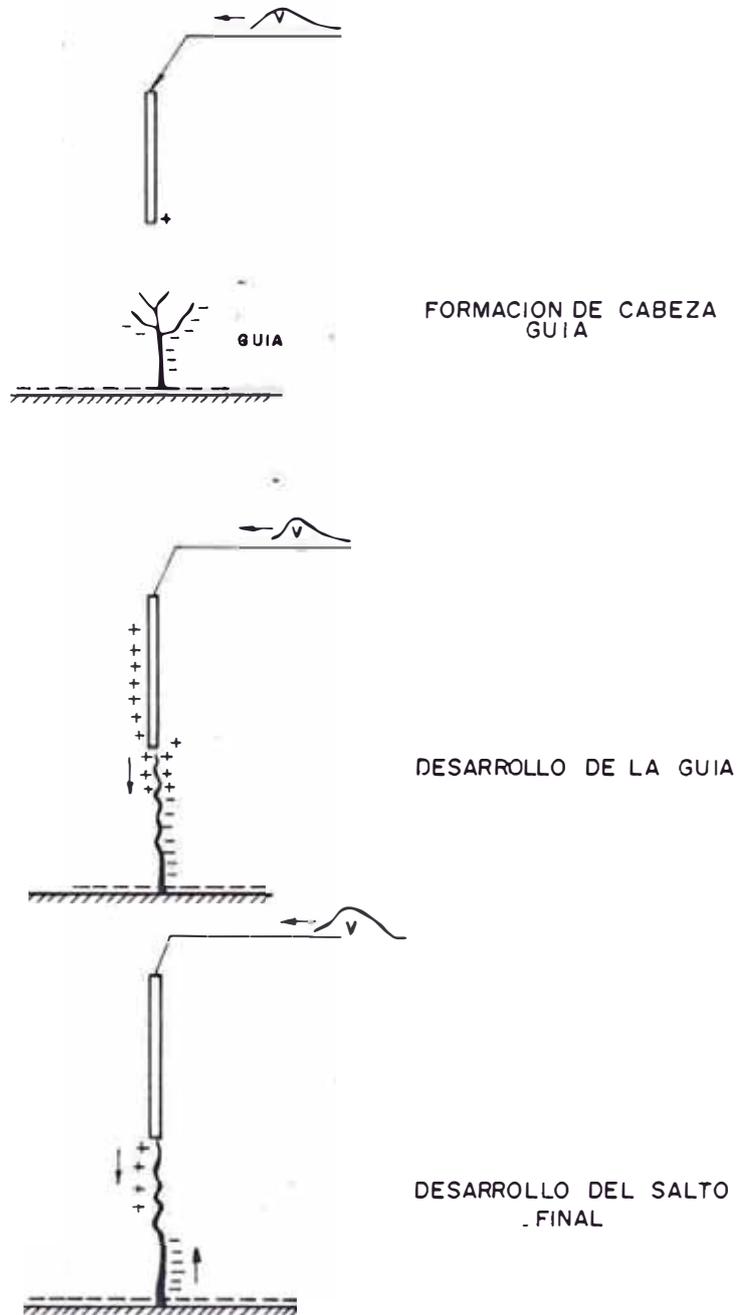
Cuando esta descarga guía llega a las proximidades del otro electrodo se produce primeramente una neutralización de las cargas aportadas por ella y en seguida la propagación rápida del fenómeno de neutralización a lo largo del camino iónizado.

La activación provocada por este proceso se evidencia por una fuerte laminosidad que progresa de un electrodo a otro constituyendo lo que se denomina el salto final. Denominaremos T_j la duración del desarrollo del salto final. Estos procesos pueden observarse en la figura N°7. Entonces:

$$T_B = T_i + T_d + T_e + T_j$$

Es conocido que existe una gran correlación entre T_d y T_i y que T_i , T_e y T_j son indepen-

FIGURA N° 7. PROCESOS DE FORMACION DEL ARCO EN BRECHAS DE AIRE



dientes. T_d puede ser comúnmente omitido y T_i , T_e , T_j serán descompuestos en dos términos cada uno. Los primeros T_{i_0} , T_{e_0} y T_{j_0} correspondientes para la duración mínima necesaria para el desarrollo del fenómeno. Estos términos están bien definidos cuando las condiciones son conocidas. Porque estos parámetros están dados para la condición óptima de desarrollo del arco.

Los segundos términos T_{i_a} , T_{e_a} , T_{j_a} corresponden a tiempos de atraso debido a la configuración microscópica de la brecha (naturaleza de iones, temperatura humedad). El tiempo de retraso puede solo ser determinado por métodos estadísticos.

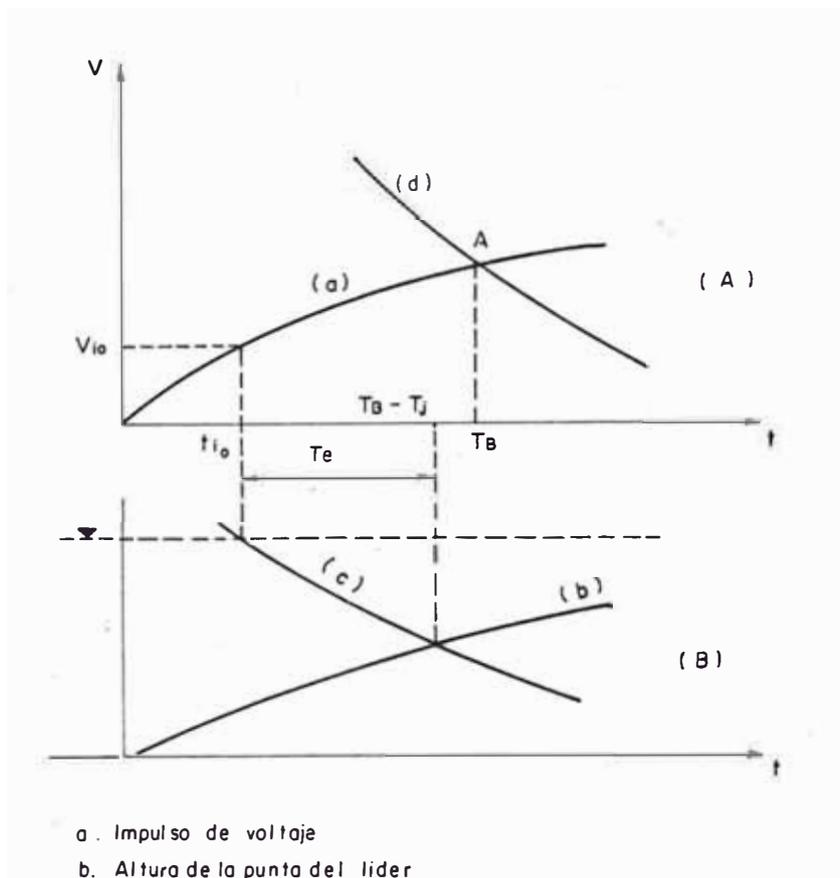
$$T_B = T_o + T_a$$

Con: $T_o = T_{i_o} + T_{e_o} + T_{j_o}$

$$T_a = T_{i_a} + T_{e_a} + T_{j_a}$$

Para la explicación de la influencia de cada uno de estos tiempos se considera una brecha barra-plano sometida a un impulso de voltaje doble exponencial.

La parte alta de la figura N°8 muestra la for



- a. Impulso de voltaje
- b. Altura de la punta del lider
- c. Características espacio-tiempo de la cabeza guía propagándose a lo largo del eje de la brecha
- d. Curva voltaje-tiempo límite

FIGURA N° 8.

- A) FUNCION VOLTAJE-TIEMPO-DEL IMPULSO DE TENSION
- B) DIAGRAMA ESPACIO-TIEMPO DE LOS PROCESOS DE FORMACION DEL ARCO EN BRECHAS DE AIRE

ma del impulso (curva a).

La parte baja es el gráfico espacio-tiempo.

Estudios sobre el fenómeno corona muestran que éste sucede cuando el campo eléctrico sobre la superficie del electrodo positivo es suficiente y cuando un electrón libre está presente en la vecindad de la punta del electrodo. Este valor umbral es evaluado teóricamente por la fórmula análoga a la Ley de Peek.

$$E_s = E_o \left(1 + \frac{K}{\sqrt{R/2}} \right)$$

Donde: E_o y K son constantes

R es radio de curvatura de la punta del electrodo

Como es posible calcular el valor del campo eléctrico en algún punto de la brecha en ausencia de carga espacial, el voltaje V_{i0} correspondiente al mínimo valor del campo eléctrico para inicio del fenómeno corona puede ser predecida.

De este modo T_{i0} puede ser deducido ya que la forma del impulso de voltaje es conocida.

La segunda condición necesaria para el fenómeno corona es la presencia de un electrón pr

mario, lo cual ocurre después de un tiempo de retardo Random, el cual será explicado más adelante.

El tiempo necesario para un desarrollo del líder a lo largo de la brecha eje, T_{e_0} puede ser estimado asumiendo el comienzo del crecimiento del líder tan pronto como el principio corona ha ocurrido (el cual es el caso cuando la divergencia del campo es pequeña). Así la cabeza guía sigue una característica espacio-tiempo como es mostrada por la curva (c) de la figura N°8.

Por otra parte, el comienzo del salto final tiene lugar cuando la altura de la punta del líder por encima del plano, cumple la siguiente relación.

$$h_f \leq \frac{U}{B}$$

Con U en kV: valor del voltaje en el instante que comienza el salto final.

$$B = 5 \text{ kV/cm}$$

$$h_f = \text{altura del salto final (cm)}$$

De la ecuación anterior puede deducirse que el salto final no puede comenzar si la altura de la punta del líder es más grande que $\frac{U}{B}$ y

es esquematizado por la curva (b) de la misma figura.

Si no existe intersección de las curvas (b) y (c) la disrupción es imposible así, la ausencia de intersección de las dos curvas es un criterio geométrico de sostenimiento.

Si la curva (c) interseca a la curva (b) el salto final puede ocurrir pero requiere algunas condiciones adicionales.

En verdad la curva (c) corresponde al caso particular de una propagación del líder a lo largo del eje de la brecha. Así el mínimo valor T_{e_0} para la propagación del líder puede ser deducido por la intersección de las curvas (b) y (c). En realidad, la punta del líder sigue un camino tortuoso aleatorio en el espacio y como ha sido mencionado T_{e_a} es un tiempo Random fuertemente dependiente sobre el camino del líder.

Si éste camino se desvía mucho del eje, la propagación adicional del líder puede ser detenido si las condiciones favorables desaparecen.

Debido a errores experimentales no ha podido establecerse una correlación entre T_{j_0} y las

condiciones de prueba, ello hasta el momento es explicado por la influencia que tienen los parámetros del circuito en la propagación del líder durante el salto final.

Como T_{j_0} representa solo una pequeña fracción de T_b , es común adjudicar a este tiempo.

$$T_{j_0} = 10 \text{ u seg.}$$

En cuanto a los tiempos aleatorios de retraso T_{i_a} , T_{e_a} , T_{j_a} hasta la fecha se han llegado a las siguientes conclusiones: El tiempo T_{i_a} puede ser predecido evaluando teóricamente la probabilidad de presencia de un electrón inicial en la vecindad de la punta del electrodo, cuando las condiciones de campo crítico están cumplidas.

Sin embargo, no es posible la predicción de T_{e_a} y T_{j_a} por medio de una aproximación teórica. Por lo tanto el tiempo total de retardo aleatorio T_a debe ser determinado empíricamente.

El efecto corona desde el punto de vista de ingeniería ha sido satisfactoriamente explicado.

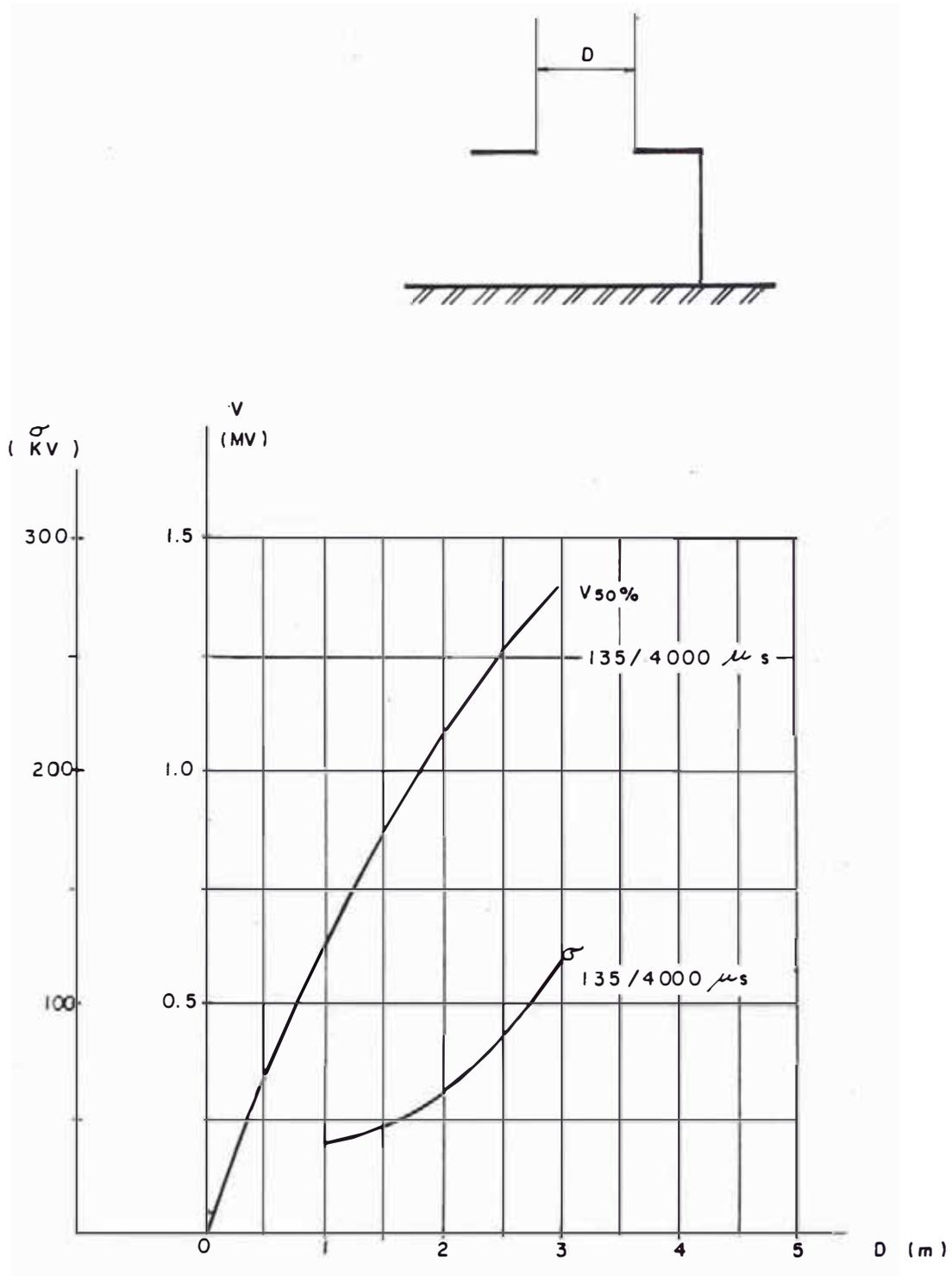


FIGURA N° 9: $V_{50\%}$ DE DISRUPCION Y LA DESVIACION STANDARD COMO FUNCION DE LA DISTANCIA DE BRECHA DE AIRE

1.3.2 Comportamiento de una Cadena de Aisladores de Suspensión

El comportamiento de una cadena de aisladores frente a las sollicitaciones dieléctricas depende fundamentalmente de un fenómeno superficial, en los denominados "caminos más exigidos"; para comprender mejor este criterio, analizaremos el modelo simplificado de dos grandes placas rigurosamente limpias, separadas entre sí por un cilindro aislante de diámetro mucho menor, tal que permita que su superficie siga aproximadamente el trazado de un tubo de fuerza entre las placas; esta condición es importante tenerla en cuenta, ya que en las cadenas de aisladores, la superficie de éstos sigue paralela en su mayor parte a las líneas del campo eléctrico.

En el modelo simplificado, experimentalmente se obtiene que la tensión disruptiva superficial del cilindro desciende con respecto a la que se tenía entre placas sin la presencia del mismo. Como el cilindro aislante a pesar de su mayor constante dieléctrica no deforma el campo, se puede entonces deducir que debido a la humedad, grasa o depósitos ácidos, hay al menos algunos puntos de la superficie que poseen mayor conductividad. La resistencia de

la película superficial en el sentido de las líneas de fuerza se distribuye, así de un modo irregular y con éllo, la caída de tensión. Las zonas mejor aisladas soportan una fracción mayor del voltaje total y la descarga superficial aparece en ellas, prematuramente.

Los fenómenos superficiales provocan una notable reducción del sostenimiento del aislamiento, con sobretensiones a frecuencia industrial y con las de maniobra; por el contrario los estudios realizados hasta la fecha han concluido que para los esfuerzos producidos por sobretensiones de rayo se presenta poca reducción del sostenimiento.

Por ejemplo, un aislador de suspensión estándar (10" x 5 3/4") a frecuencia industrial en seco tiene una tensión de sostenimiento a 50% de 80 kV y con 0.01 mg/cm² de depósitos de sal equivalente: 17.8 kV; con sobretensiones de maniobra se tiene bajo condiciones limpias 125 kV y con 0.02 mg/cm² de sal equivalente: 47 kV. Debe tenerse presente que estos valores son referenciales pues dependen del tipo de contaminante; es necesario recordar que a igualdad de equivalente salino superficial y humedecimiento en cadenas de aisladores idénticas, la tensión de sostenimiento es depen -

diente del contenido de sustancias inertes, que al constituir una capa envolvente crea enlaces de continuidad eléctrica; por otro lado, los electrolitos solubles al estar humedecidos forman una película de líquido conductivo cuya resistividad está en función del grado de humedad y de la cantidad de ellos presentes en la contaminación. Además la tensión de sostenimiento a frecuencia industrial es considerablemente afectada por las sales inertes, atribuyéndose ésto a la capacidad de retención del agua y al tamaño de las partículas contaminantes.

El voltaje de contorno con impulsos de rayo tiene una dependencia lineal con el incremento de la longitud de la cadena de aisladores en cambio con sobrevoltajes de corta duración a frecuencia industrial en seco y con impulsos de maniobra las curvas muestran una tendencia de saturación, lo cual llega a ser más notorio cuando la longitud de la cadena excede 3.5 m (25 aisladores) esto se debe a que la distribución de voltaje a lo largo de la cadena de aisladores está principalmente determinada por las capacitancias parásitas estáticas, las cuales determinan una distribución de voltaje no lineal. Las pruebas con

este tipo de esfuerzo bajo lluvia muestran un comportamiento lineal respecto a la longitud de la cadena de aisladores, por lo tanto cuando esta longitud excede de 5 m. el voltaje de contorno con lluvia supera el voltaje de contorno en seco. La linealidad observada bajo condiciones de lluvia se debe a que la resistencia superficial de los aisladores se uniformiza permitiendo una mejor distribución del voltaje.

La tendencia de saturación con impulsos de maniobra es de suma importancia en el análisis del comportamiento de una cadena de aisladores en sistemas EAT; sin embargo, en sistemas AT puede aceptarse un comportamiento lineal.

Todas las curvas características pueden observarse en la figura N°10.

Es importante señalar que el sostenimiento del aislamiento de una brecha de aire entre el conductor y la torre cuando se aplica un impulso de maniobra es solo ligeramente reducido cuando se introduce una cadena de aisladores de longitud igual a dicho espaciamiento, ésta es la propiedad que sirve de base para numerosas recomendaciones formuladas a nivel internacional, por ejemplo en el "EHV Transmission Line

Reference Book" de la General Electric, recomienda para la determinación de la distancia a masa; γ esto es, que dicha distancia con el ángulo de oscilación de la cadena de 15° debe ser cuando menos igual a la longitud de la cadena de aisladores.

Los valores de sostenimiento de un aislador están reglamentados por diferentes normas (IEC, ANSI, NEMA, etc.); en concordancia con esto numerosos fabricantes elaboran diferentes modelos de aisladores, por ejemplo, los aisladores tipo Ball & Socket o Espiga-Caperuza (10" x 5 3/4") fabricados por NGK INSULATORS LTD. que cumplen con las especificaciones IEC son: CA-515MC, CA-525MC, CA-525EC (Tabla N°4) y los que cumplen con las especificaciones ANSI son: CA-513MC, CA-525MR, CA-500MQ, CA-531MK (Tabla N°5).

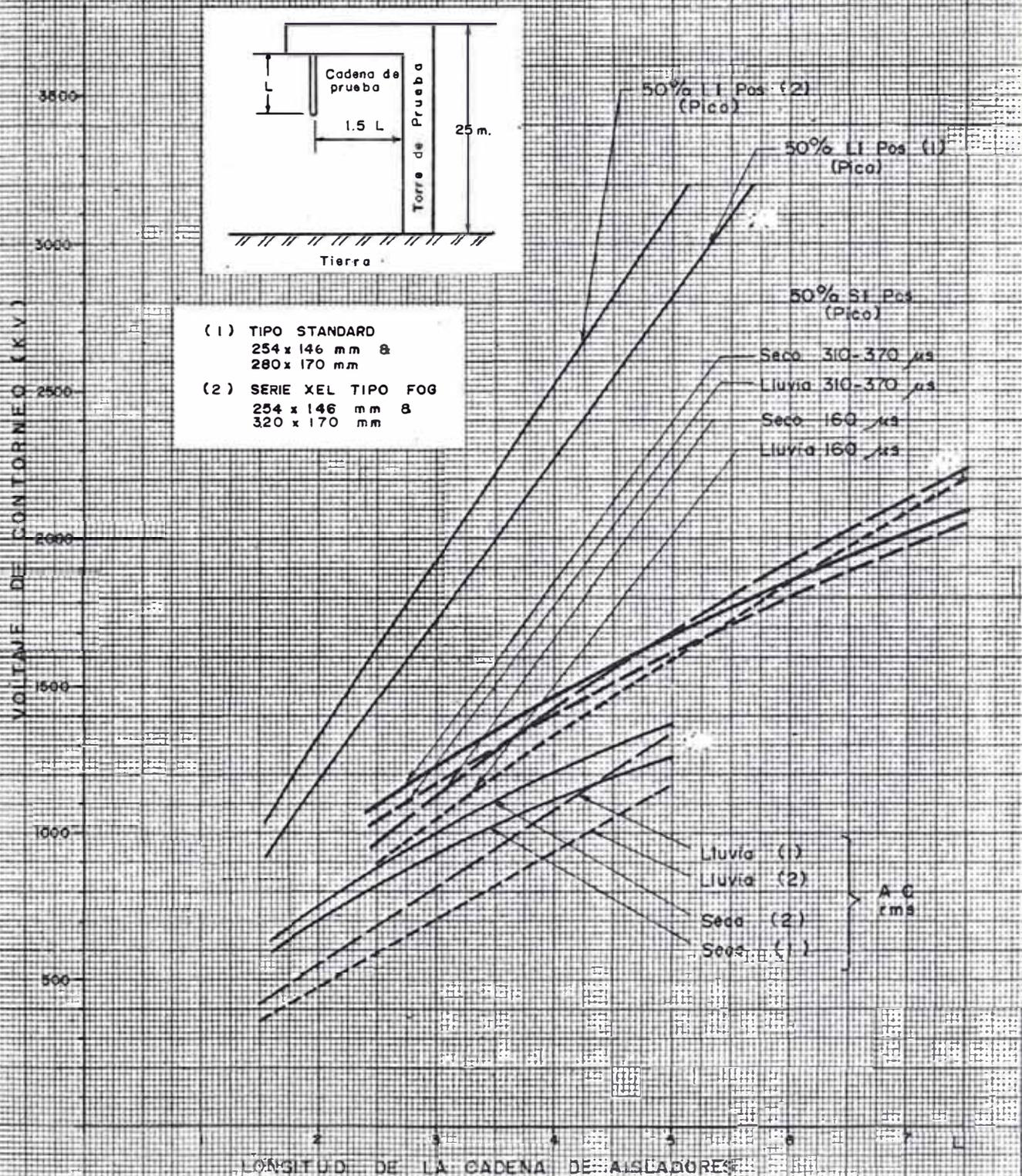


FIGURA N° 10 CARACTERISTICAS DE VOLTAJE DE CONTORNEO DE UNA CADENA DE AISLADORES DE SUSPENSION.

TABLA N°4

CADENAS DE AISLADORES DE SUSPENSION SIN ANILLO DE CAMPO

BASADO EN EL PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS DE IEC

PUB. 274

N° de Aisladores 254 x 146 mm	50% IMPULSE MINIMUM FLASHOVER (kV)	
	Positiva	Negativa
1	120	125
2	230	230
3	320	310
4	400	375
5	470	445
6	550	525
7	625	605
8	700	685
9	775	760
10	850	835
11	920	915
12	995	995
13	1065	1070
14	1140	1145
15	1210	1225
16	1280	1295
17	1355	1375
18	1425	1455
19	1500	1530
20	1570	1605
21	1640	1680
22	1710	1755
23	1780	1830
24	1850	1905
25	1920	1980

TABLA N°5

CADENA DE AISLADORES DE SUSPENSION SIN ANILLO DE CAMPO

BASADO EN EL PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS DE ANSI

C29.1

N° DE AISLADORES 254 x 146 mm	CRITICAL IMPULSE AVERAGE FLASHOVER (kV)	
	Positiva	Negativa
1	125	130
2	255	255
3	355	345
4	440	415
5	525	495
6	610	585
7	695	670
8	780	760
9	860	845
10	945	930
11	1025	1015
12	1105	1105
13	1185	1190
14	1265	1275
15	1345	1360
16	1425	1440
17	1505	1530
18	1585	1615
19	1665	1700
20	1745	1785
21	1825	1870
22	1905	1955
23	1985	2040
24	2065	2125
25	2145	2210

CAPITULO II

EL SOSTENIMIENTO ELECTRICO DEL AISLAMIENTO

Los aislamientos en función de su comportamiento en caso de aparición de una descarga disruptiva en el curso de un ensayo dieléctrico se clasifican en aislamientos no autorregenerables y aislamientos autorregenerables.

Las estructuras aislantes de una línea de transmisión tienen ambos tipos de aislamientos, la probabilidad de que se produzca una descarga en los elementos no autorregenerables (porcelana, vidrio) en presencia del elemento autorregenerable (aire atmosférico) es generalmente despreciable, dependiendo de la amplitud de la onda aplicada. Debido a las características tensión-tiempo de cebado en los aislamientos sólidos y en los aislamientos en el aire esta probabilidad tiende a crecer cuando la tensión de los impulsos crece.

El concepto estadístico de sostenimiento se aplicará a los elementos autorregenerables, como es el caso del aire atmosférico.

Para la definición de la tensión de sostenimiento se asume que el comportamiento estadístico del dieléctrico, cuando es sometido a un esfuerzo impulsional de maniobra,

sigue una distribución probabilística Gaussiana.

Sabemos que la tensión de contorno a 50% (CF0), es aquella para la cual se tiene una probabilidad de descarga (o sostenimiento) de 50%.

La desviación normalizada de CF0, se toma como la mitad del rango de tensiones entre el 16% y el 84% de los contorneos.

$$\sigma = \frac{U_{84\%} - U_{16\%}}{2}$$

2.1 Definición

El sostenimiento es definido según el Comité Técnico N°28 de la IEC, como el voltaje correspondiente para un 10% de probabilidad de contorno.

$$V_{s0} = CF0 (1 - 1.28 \sigma)$$

Y según el EPRI (Electrical Power Research Institute), como el voltaje correspondiente para un 0.13% de probabilidad de contorno.

$$V_{s0} = CF0 (1 - 3 \sigma)$$

2.2 Factores que afectan el Sostenimiento Eléctrico

El sostenimiento del aislamiento a las sobretensiones por maniobra depende de diferentes variables, las cuales deben tenerse en cuenta, dichas variables son:

- Forma de Onda
- Condiciones Atmosféricas
- Parámetros Geométricos

2.2.1 Influencia de las Condiciones Atmosféricas

Las condiciones atmosféricas tales como la densidad relativa del aire, humedad y precipitación afectan el sostenimiento del aislamiento externo a las sobretensiones de maniobra.

El conocimiento de estos factores tiene gran importancia desde el punto de vista práctico si se tiene en cuenta que el recorrido de las líneas de transmisión a 220 kV en nuestro país tienen tramos de cota superior a los 4,500mts y a nivel mundial líneas a 500 kV y a 3,000 m.s.n.m.; el efecto de altitud influye en la cohesión molecular del aire atmosférico, reduciendo básicamente su densidad y el grado de humedad, estos factores externos como tales, influyen decisivamente en el comportamiento de la infraestructura eléctrica, pudiendo crear problemas asociados a la reducción del gradiente disruptivo del aire en forma de corona, radio interferencias, pérdidas de potencia o descargas de diferente tipo hasta el arco eléctrico.

Densidad Relativa del Aire

El aire atmosférico se rige por las leyes de los gases y por lo tanto su comportamiento respecto del sostenimiento eléctrico estará supeditado a las variaciones de su densidad, la cual a su vez es dependiente de la presión y la temperatura.

La razón de la densidad del aire a la presión b y temperatura t , con relación a la densidad del aire a condiciones estándar viene a ser la densidad relativa del aire (RAD).

El sostenimiento del aislamiento con cualquier forma de campo es proporcional a la densidad del aire y por tanto a la presión atmosférica e inversamente proporcional a la temperatura absoluta $273 + T$ para longitud de brechas de aire menores que 1 m.

$$CFO_{b,t} = K \frac{b}{273 + t}$$

$$CFO_{b_o,t_o} = K \frac{b_o}{273 + t_o}$$

Se llega dividiendo ambas expresiones a la ya conocida expresión para calcular el sostenimiento a 50% a una presión y temperatura dada.

$$CF0_{b,t} = CF0_{b_o,t_o} \left(\frac{b}{b_o} \right) \left(\frac{273 + t_o}{273 + t} \right)$$

$$RAD = \frac{b}{b_o} \frac{273 + t_o}{273 + t}$$

La densidad relativa del aire (RAD) es:

$$RAD = 0.392 \frac{b}{273 + t} \text{ normas ANSI}$$

$$RAD = 0.386 \frac{b}{273 + t} \text{ normas IEC}$$

b : presión atmosférica en mm Hg

t : temperatura en grados centígrados

Las condiciones atmosféricas estándar ligeramente diferentes entre IEC y ANSI son:

IEC Publ.60-1962 ANSI C68-1, 1968

Presión Barométrica (b_o)	760 mm Hg	760 mm Hg
-------------------------------------	-----------	-----------

Temperatura (t_o)	20°C	25°C
--------------------------	------	------

Si bien es posible calcular en esa forma el factor de densidad del aire, su utilización como factor de corrección K_d requiere de un exponente n para su aplicación a los esfuer -

zos eléctricos en brechas de aire mayores que 1 m.

$$K_d = (\text{RAD})^n$$

n : exponente dependiente del espacio entre electrodos (S). Figura N°12

$$\begin{array}{ll} n = 1.0 & S \leq 1 \\ n = 1.12 - 0.12 (S) & 1 < S < 6 \\ n = 0.4 & S \geq 6 \end{array}$$

Para el cálculo de la densidad relativa del aire puede hacerse uso de las ecuaciones presentadas anteriormente pero teniendo presente si se está trabajando con parámetros estándar IEC o ANSI. En el caso de requerirse este valor en el sistema IEC puede hacerse uso del nomograma de la Figura N°11.

Humedad del Aire

El sostenimiento del aislamiento con campos uniformes o no muy irregulares, donde el efluvio se origina directamente de la descarga oscura, es independiente del grado de humedad.

No ocurre lo mismo con campos fuertemente deformados, casos en los cuales la tensión de descarga varía con la humedad absoluta del

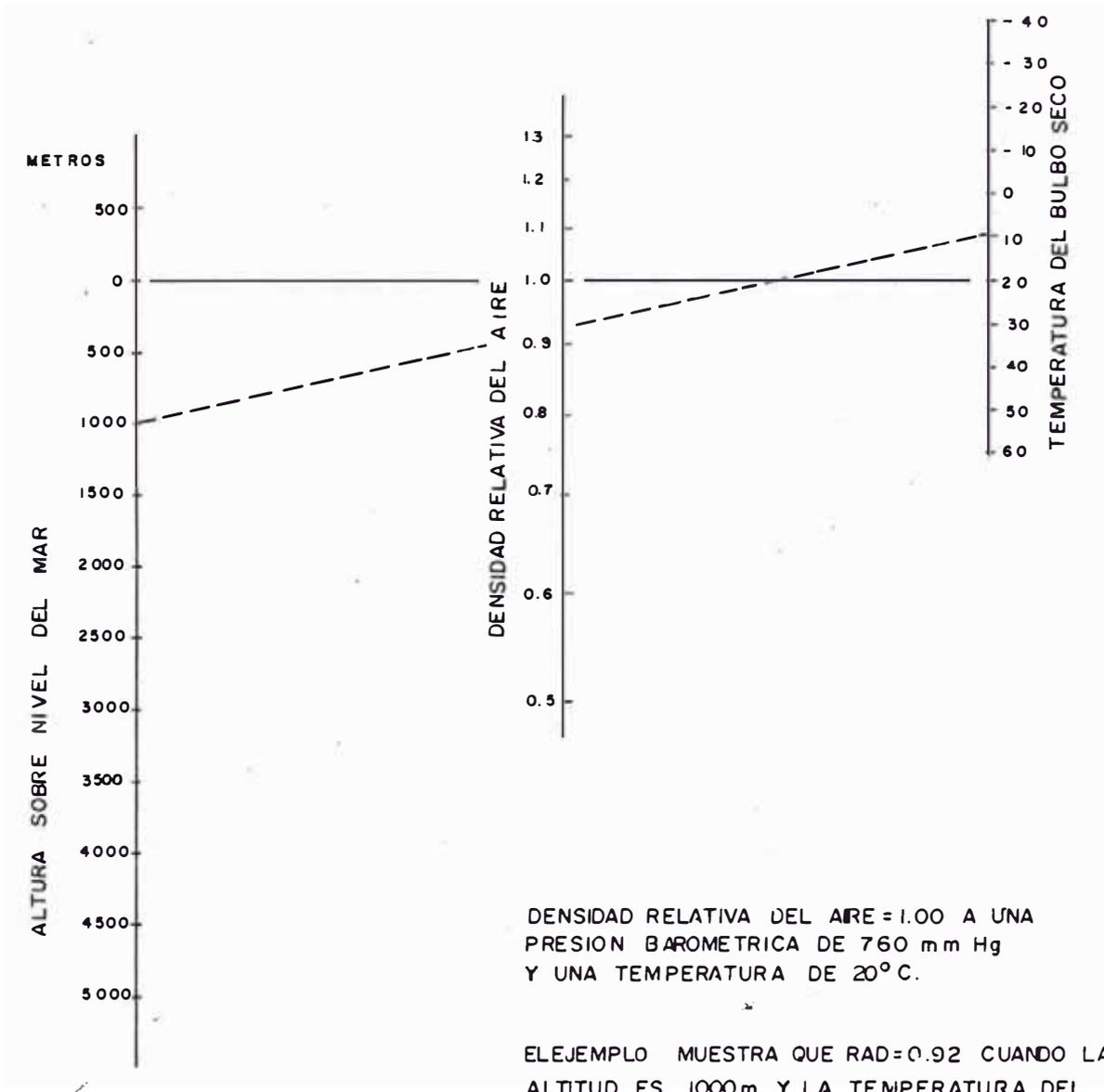
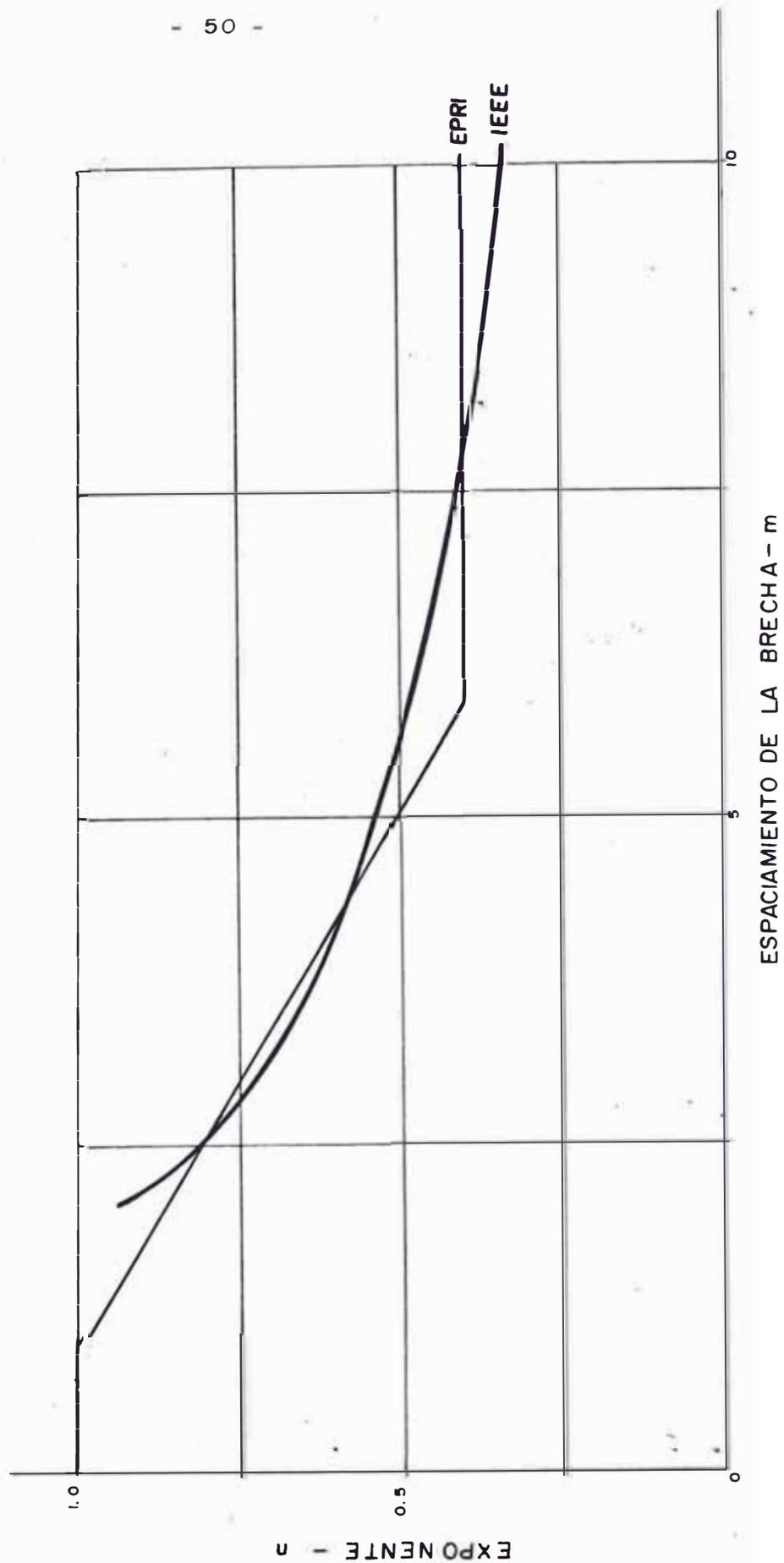


FIG. N° 11
NOMOGRAMA DE LA DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE COMO UNA FUNCION DE LA ALTURA Y TEMPERATURA IEC

FIG. Nº 19 : EXPONENTE PARA CALCULAR EL FACTOR DE CORRECCION DE CFO POR HUMEDAD Y RAD



aire (no, apenas, con la relativa), creciendo aquella a medida que la humedad aumenta.

La mayor parte de cambios en las condiciones atmosféricas corresponden a los cambios del contenido de agua en suspensión, que puede existir en cualquiera de los estados, sólido, líquido o gaseoso; teniendo en cuenta que el aire es utilizado como un dieléctrico en los aislamientos de intemperie, es de suponer que todo elemento extraño en mayor o menor grado de concentración como es el caso del agua, tendrá que influir en el sostenimiento de las tensiones aplicadas.

La humedad del aire antes de evaluar su influencia eléctrica; se le puede obtener mediante la densidad de vapor de agua en gr/m^3 , que también toma el nombre de concentración de vapor o humedad absoluta; la saturación de humedad en el aire, para una temperatura determinada, se da con el equilibrio de absorción y liberación molecular a partir de una superficie de agua; este equilibrio supone una presión molecular P_v que puede deducirse de la siguiente forma:

Si la temperatura fuese constante, la ley de Boile considera el producto de la presión P

por el volumen V como un valor constante.

$$P \times V = K_1 = \text{constante} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la masa m del g es también constante dividiéndola en ambos términos se obtendrá:

$$P \times \rho = K_2, \text{ luego } P = K_2 h \quad (2)$$

Donde ρ volumen por unidad de masa (volumen específico) es decir el recíproco de la densidad h , o masa por unidad de volumen.

En realidad, la temperatura es también variable y la dilatación del volumen del aire depende de ella; si se considera la presión constante, podría aplicarse la Ley de Charles afectada de un coeficiente de proporcionalidad derivado del uso de la escala de Kelvin ($^{\circ}T$).

$$V = K_3 V_0 \Delta T \quad (3)$$

donde: $K_3 = \frac{1}{273}$

El volumen inicial V_0 es supuesto a la temperatura $0^{\circ}C$ sumándolo a ambos miembros y expresando en temperatura absoluta se tiene:

$$V = \frac{1}{273} V_0 T, \text{ o si no } \frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \quad (4)$$

Si se combinan las expresiones (2) y (4) para determinar la relación entre las condiciones iniciales P_o , ρ_o , T_o y las condiciones finales P_1 , ρ_1 , T_1 del aire se tendrá:

$$P_v = h_v K_4 T \quad (5)$$

o sea
$$h_v = \frac{1}{K_4} \frac{P_v}{T} \quad (6)$$

donde K_4 : constante de los gases para el vapor de agua $4.62 \times 10^6 \text{ seg}^{-2} \text{ grado}^{-1}$

La expresión deducida permite calcular la densidad de vapor de agua en gr/m^3 conociendo la presión y la temperatura, el valor máximo corresponderá a la presión de saturación para dicha temperatura. Actualmente la deducción del coeficiente de corrección por humedad H_o , se facilita por el uso de tablas complementarias (Norma IEC-60.1-73) y su aplicación se hace mediante el factor de corrección K_h .

$$CF0_s = CF0 \times K_h$$

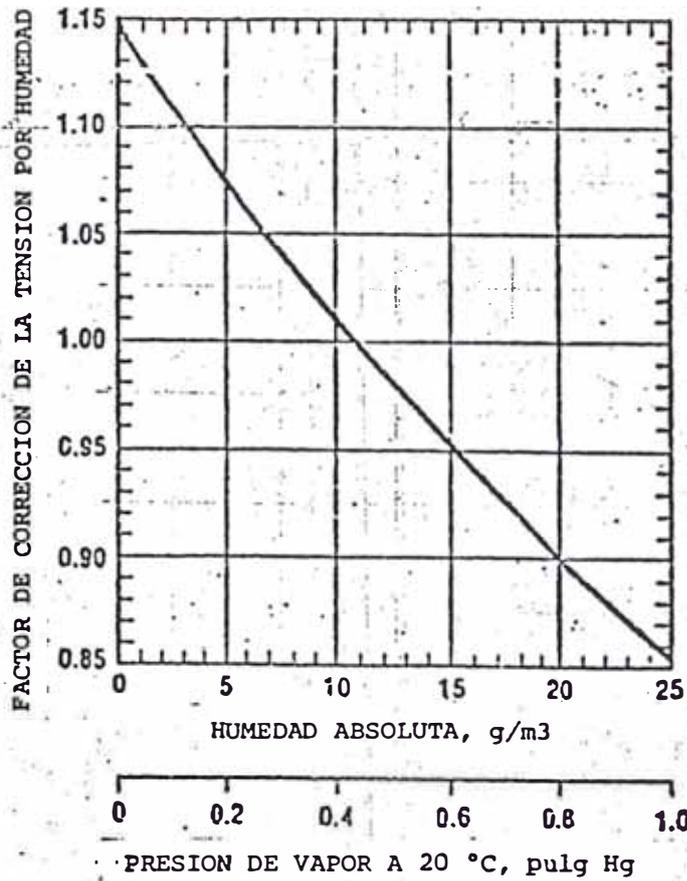
- $CF0$: tensión a 50% a las nuevas condiciones
- $CF0_s$: tensión a 50% a condiciones estándar

$$K_h = (H_o)^w$$

w : exponente en función de la distancia de la brecha

TABLA N°6

TEMPERATURA AMBIENTE EN GRADOS °C (TERMOMETRO SECO)	% DE HUMEDAD DEL AIRE	HUMEDAD ABSOLUTA (h _v) gr/m ³
10	20	1.8
	40	3.7
	60	5.6
	80	7.6
	100	9.5
15	20	2.6
	40	5.2
	60	7.8
	80	10
	100	13
20	20	3.4
	40	7
	60	10.3
	80	13.7
	100	17.4
25	20	4.5
	40	9.4
	60	13.8
	80	18.3
	100	22.9
30	20	6
	40	12.3
	60	18.3
	80	24.2
	100	30.4
35	20	8
	40	16
	60	24
	80	32.2
	100	40



CARACTERISTICA DE CORRECCION POR HUMEDAD PARA TENSIONES DE 60 Ciclos/seg.

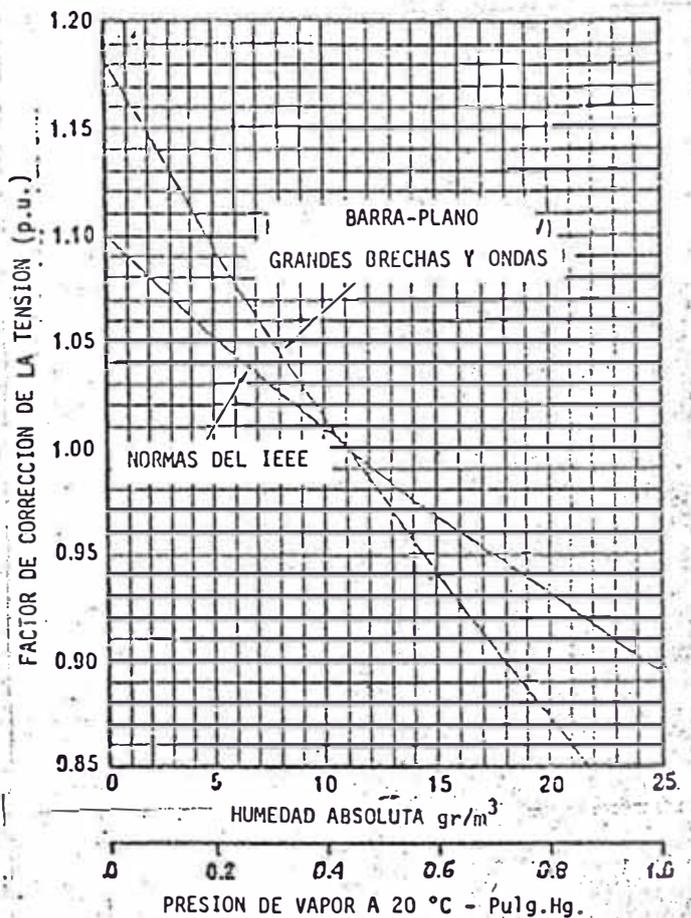
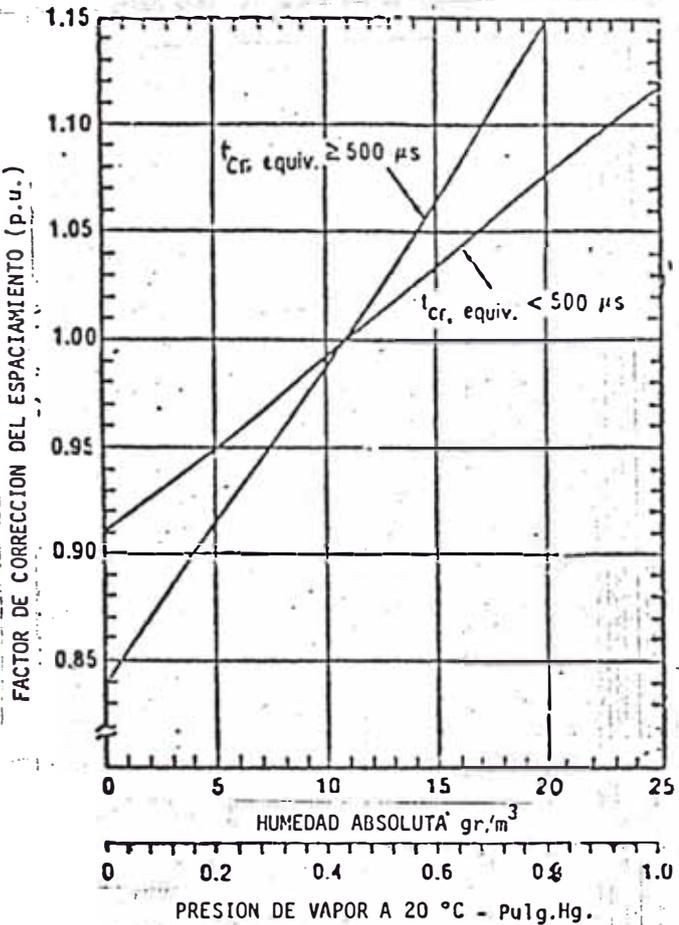


FIG. N° 13. -FACTORES DE CORRECCION POR HUMEDAD ABSOLUTA

Según la IEC el coeficiente de corrección por humedad se le denomina humedad "Base" y puede ser calculado por la siguiente expresión.

$$H_o = 1 + 0.009 (11-h)$$

y según las normas americanas ANSI

$$H_o = 1 + 0.009 (15-h)$$

donde: h : es la humedad absoluta del aire

Y se relaciona con la presión parcial de los vapores de agua que se encuentran en el aire o tensión de vapor (VP) a 20°C, por la siguiente ecuación.

$$h_v = 25 VP$$

donde: h_v : en gr/m^3

VP : en pulgadas de Hg

Al igual que para el caso del coeficiente, n , que afecta la densidad del aire, el coeficiente W , aplicado al coeficiente de corrección por humedad, no ha podido ser claramente definido en lo concerniente a las condiciones de altitud superior a 1800 m.s.n.m.; hasta la fecha sólo se ha podido correlacionar con su magnitud, el tipo y la polaridad de la tensión así como la distancia existente entre electro

dos de campo no uniforme para los cuales va -
ría en las proximidades de la unidad; de modo
que su utilización para altitudes del orden de
3000 metros o altitudes mayores donde ni el
mismo coeficiente H_0 sigue una ley lineal re -
sulta solamente referencial. Teniendo en cuen -
ta las consideraciones anteriores y siendo has -
ta la fecha lo más aproximado para conside -
rar el efecto de la humedad del aire en el sos -
tenimiento se hará uso de la siguiente expre -
sión.

$$K_h = (H_0)^n, \text{ Fig. N}^\circ 13$$

Donde, n: es el mismo exponente utilizado pa -
ra el factor de corrección por den -
sidad relativa del aire (Fig. 12)

Precipitación Pluviométrica

La influencia de la lluvia sobre el sosteni -
miento del aislamiento depende principalmente
del arreglo de electrodos y de la polaridad
del esfuerzo aplicado y en el caso de cadena
de aisladores depende del tipo y forma del ais -
lador.

Bajo condiciones secas el sostenimiento con
ondas de polaridad negativa es generalmente
más alto que con ondas de polaridad positiva,

por ejemplo, para una cadena de 20 aisladores de suspensión sin anillo de campo es 3% mayor.

La lluvia para algunas configuraciones hace reducir notoriamente el sostenimiento con impulsos negativos, llegando a valores iguales o más bajos, que con impulsos positivos, que son solo ligeramente reducidos por la lluvia.

Un análisis comparativo de la influencia de los arreglos de las cadenas de aisladores, fue realizado por L. Paris; sus resultados muestran que para cadenas de aisladores de suspensión, el sostenimiento con ondas de polaridad positiva no es significativamente afectado por la lluvia, las ondas de polaridad negativa reduce el sostenimiento como muestra la Fig.13A.

Por lo tanto, en términos generales, las sobretensiones de ambas polaridades tienen que ser consideradas en el análisis bajo condiciones de lluvia.

Una razón, más que demuestra la poca influencia de la lluvia sobre el sostenimiento con impulsos positivos puede deducirse de las características de voltaje de contorno en función de la longitud de la cadena de aisladores.

La tensión de contorno con impulsos de manio

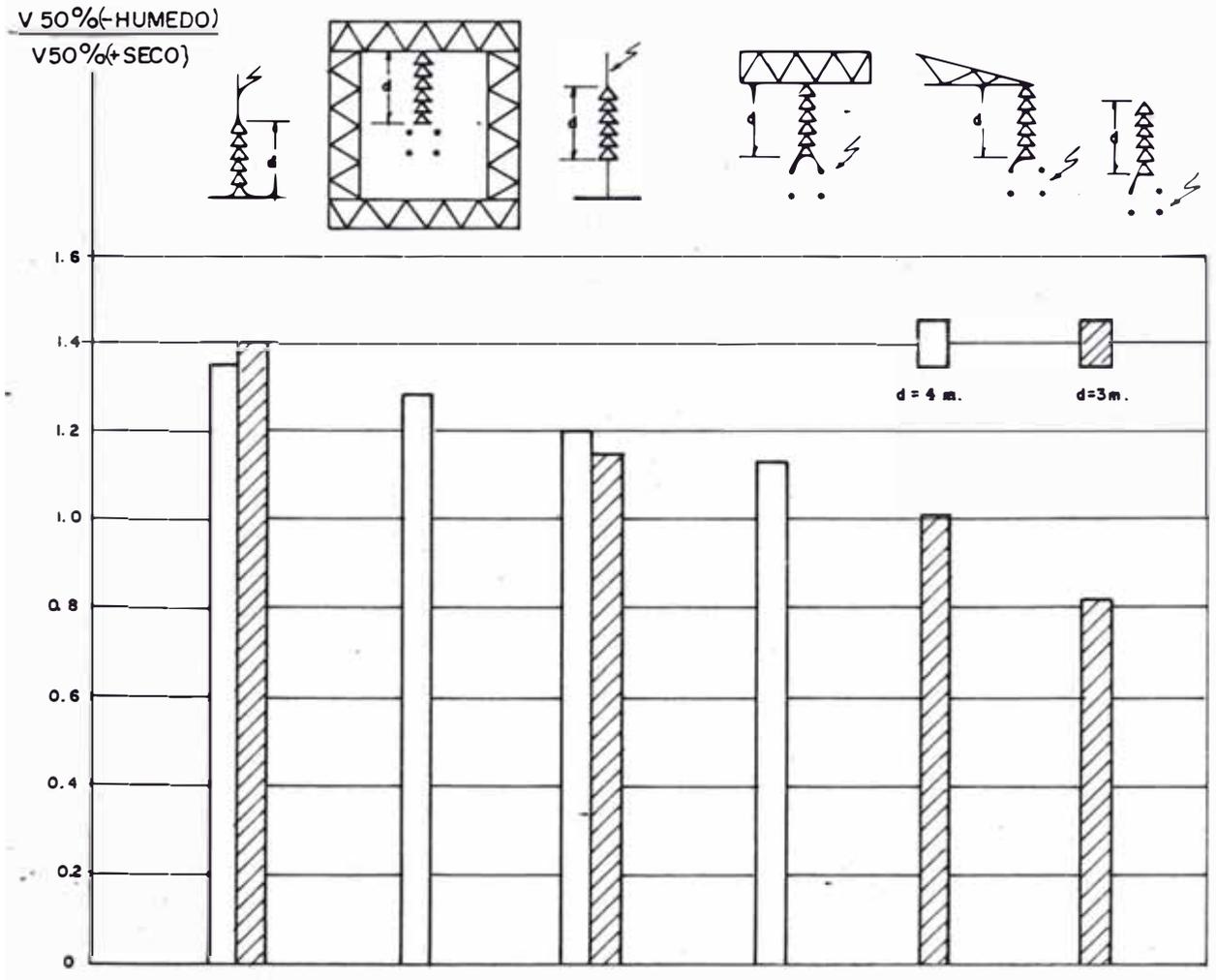


FIG. N°13A : RELACION CFO (-HUMEDO)/CFO (+ SECO) PARA DIFERENTES ARREGLOS DE CADENA DE AISLADORES

bra de polaridad positiva no tiene una dependencia lineal con la longitud de la cadena de aisladores bajo condiciones de lluvia al igual que bajo condiciones secas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones puede usarse en el cálculo de la tensión de contorno a 50% al impulso bajo condiciones estándar un factor de corrección por precipitación pluviométrica, K_p . De acuerdo a lo recomendado por el EPRI, se puede asegurar que la lluvia tiene un efecto reductor en las tensiones de sostenimiento del orden del 5%

$$\text{Luego: } CF0_c = CF0/K_p$$

donde: $CF0_c$ = tensión a 50% corregida por lluvia

$CF0$ = tensión a 50% bajo lluvia

K_p = factor de corrección por la lluvia 1.05 (normalmente aceptado)

Sostenimiento Relativo del Aislamiento (RIS)

El sostenimiento relativo del aislamiento (Relative Insulation Strength), relaciona el $CF0$ de un aislamiento dado, bajo condiciones atmosféricas determinadas, con el $CF0$ bajo condiciones atmosféricas estándar.

Este parámetro permite determinar el sosteni-

miento del aislamiento para condiciones diferentes de las especificadas en las pruebas. El sostenimiento relativo del aislamiento depende, de la densidad relativa del aire, de la humedad y de la lluvia.

$$RIS = \frac{K_d}{K_h} \cdot K'_p = \left(\frac{RAD}{H_o}\right)^n \cdot K'_p$$

$$CFO = CFO_s \cdot RIS$$

luego:
$$CFO = CFO_s \cdot \frac{RAD^n}{H_o^n} K'_p$$

donde: CFO = tensión a 50% en cualquier condición atmosférica

CFO_s = tensión a 50% en condiciones estándar

RAD = densidad relativa del aire

H_o = humedad base

K'_p = factor de corrección por precipitación ($K'_p = 0.95$)

2.2.2 Influencia de la Forma de Onda

La forma y la duración del frente de la onda, afectan el valor del sostenimiento del aislamiento externo. El efecto depende de la polaridad, configuración de la brecha principalmente.

Para una brecha dada, existe una duración de frente, definido por el "Tiempo Crítico de Cresta" el cual corresponde al mínimo voltaje disruptivo (CRITICAL FLASHOVER VOLTAGE). El efecto del frente crítico no es apreciable para brechas cuya longitud sea inferior a 1 m. y para brechas más grandes con campos uniformes.

La duración del frente crítico depende del largo de la brecha, generalmente con el incremento de la longitud de la brecha, incrementa la duración del frente crítico. Para un sistema de electrodos barra - Plano de 3 m, la duración del frente crítico es 150 μ s., para brechas sobre 15 m. es 500 μ s. (Fig. N°14).

Para una cadena de 18 aisladores de disco, es aproximadamente $T_f = 160 \mu$ s. (Fig. N°15).

El tiempo para que se produzca la disrupción está relacionado con el espaciamiento de la brecha y con el tiempo de cresta del impulso aplicado. Para tiempos de cresta mas cortos que el crítico, la disrupción ocurre por lo general después de la cresta y para tiempos de cresta más grandes que el crítico la disrupción sucede generalmente antes del crítico.

En este último caso el voltaje de disrupción

es más grande o igual que el valor de cresta de la onda crítica.

Es necesario indicar que no solo la tensión de contorno a 50% (CF0), sino también la desviación estándar (σ_f) es una función del tiempo de cresta, el mínimo valor de la desviación σ_f generalmente corresponde a la forma de onda que tiene tiempo crítico de cresta.

Experiencias en proyectos UHV y pruebas de laboratorio conducen a una relación empírica relacionada con el tiempo de cresta que produce el más bajo CF0, y el espaciamento de brecha.

$$T_c = 54S - 60$$

Donde:

T_c = tiempo crítico en us. (Fig. N°15)

S = espaciamento, dentro del rango de 4 á 15 m.

Para tiempos de cresta (T) diferentes que el tiempo crítico T_c , y para una brecha dada, las correcciones para los voltajes pueden observarse en la Tabla N°7.

De la información proporcionada por N G K INSULATORS LTD. en su Guía Técnica se ha deducido una expresión entre el tiempo crítico T_c

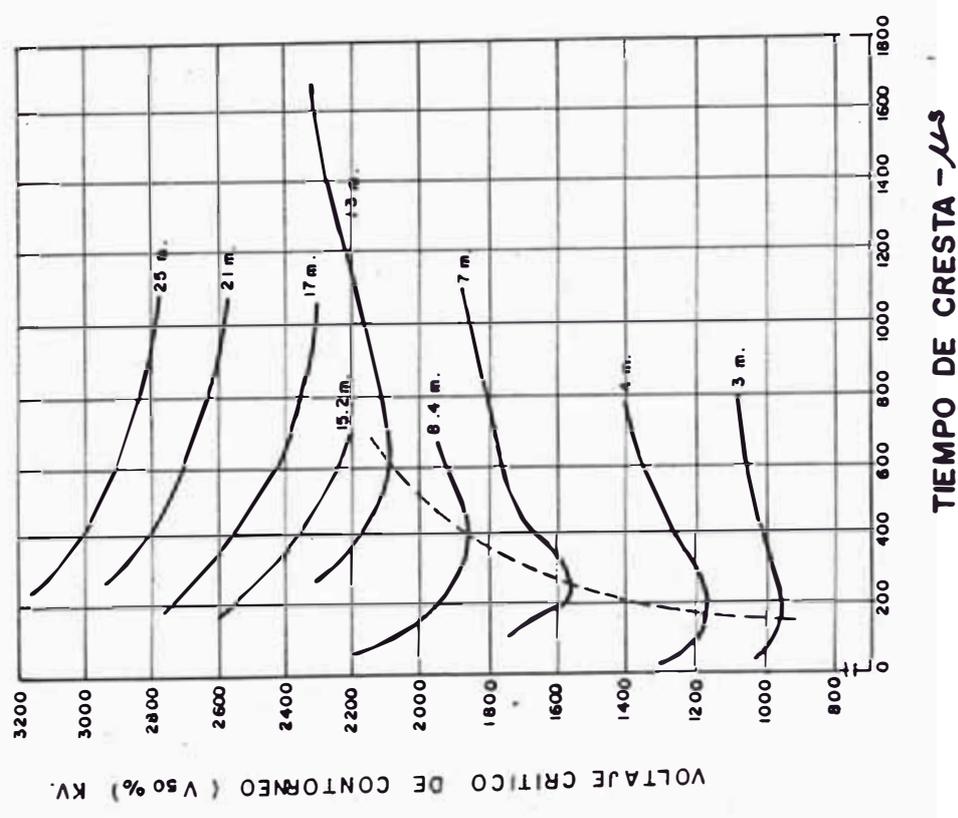


FIGURA N° 14 : VOLTAGE CRITICO DE CONTOREO DE UNA BRECHA BARRA - PLANO COMO FUNCION DEL TIEMPO DE CRESTA

TIEMPO DE CRESTA - μs

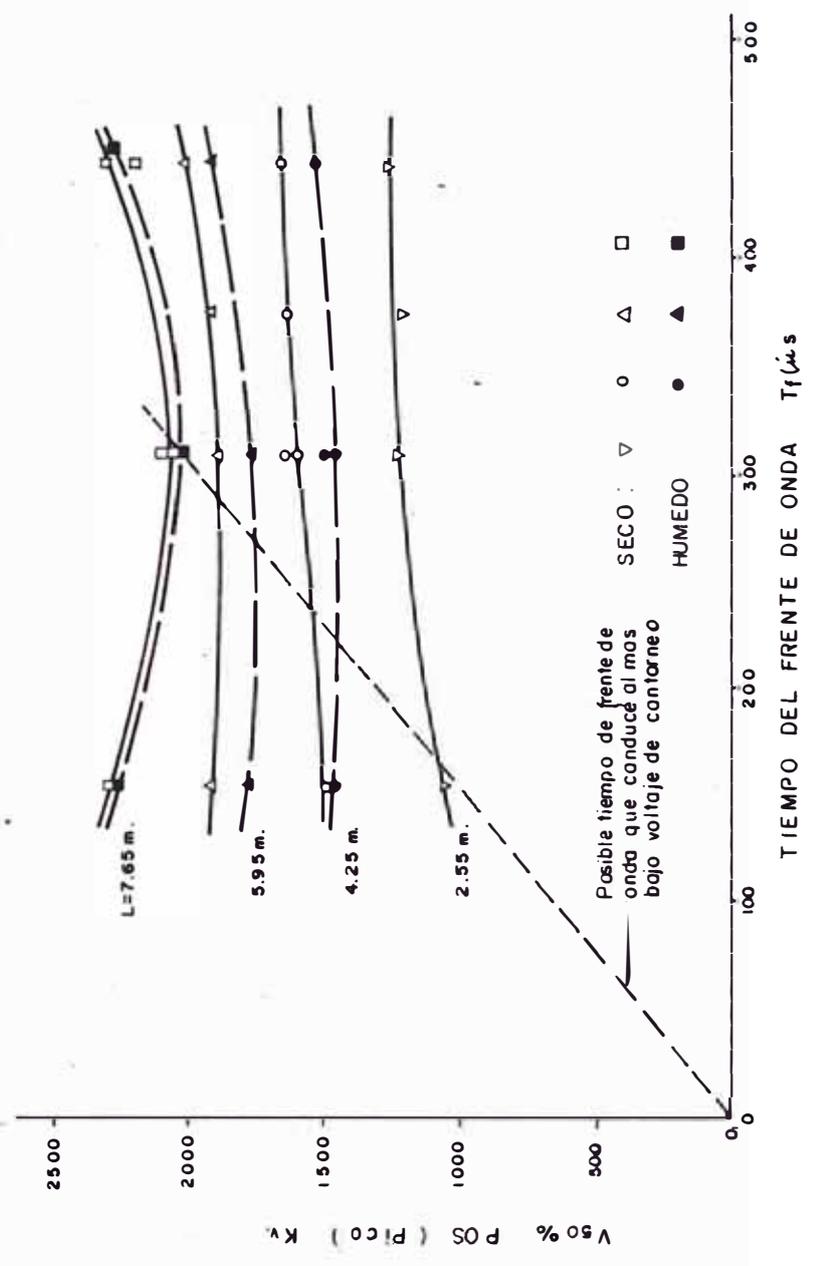
TABLA N°7

FACTORES DE CORRECCION PARA $V_{50\%}$ CUANDO SE TIENE TIEMPOS

DE CRESTA DIFERENTES DEL TIEMPO CRITICO

T-T _c us	S = 4 á 7 m	S = 8 á 15 m
	V (kV)	V (kV)
-400	-	200
-300	-	175
-200	-	90
-100	90	35
- 50	20	20
0	0	0
50	20	0
100	35	5
200	110	20
300	150	40
400	190	70
500	220	90
600	250	130
700	320	150

FIGURA N° 15 : INFLUENCIA DEL FRENTE DE ONDA SOBRE EL VOLTAJE DE CONTORNEO DE UNA CADENA DE AISLADORES



y la longitud de la cadena de aisladores; dentro del rango de 2.55 y 4.25 m.

$$T_c = 47L + 40$$

2.2.3 Influencia de los Parámetros Geométricos

La influencia de la proximidad de la torre de acero, sobre el voltaje de contorno de las cadenas de aisladores, para los impulsos de maniobra; es en algunos casos muy significativa.

Como se muestra en la figura N°17, el voltaje de contorno de una cadena de aisladores, cambia por variación de la distancia entre la cadena y la torre. El efecto de este cambio supera el 20%.

Para el estudio de la influencia de las configuraciones, estas las clasificaremos en: (A), (B) y (C), como se muestran en la figura N°18; para las configuraciones (A) y (B), el voltaje de contorno con impulsos de maniobra positivos son prácticamente iguales, pero en el caso (C), el voltaje de contorno se reduce en 4% comparada con las dos configuraciones anteriores. Esta es posible debido a un incremento de los caminos de contorno y a una intensificación del campo eléctrico cerca del electrodo.

La influencia de la tierra no es significativa en cadenas de aisladores de suspensión.

FIGURA N° 17: INFLUENCIA DE LA DISTANCIA A LA ESTRUCTURA A LA ESTRUCTURA SOBRE EL VOLTAJE DE CONTORNEO DE UNA CADENA DE AISLADORES

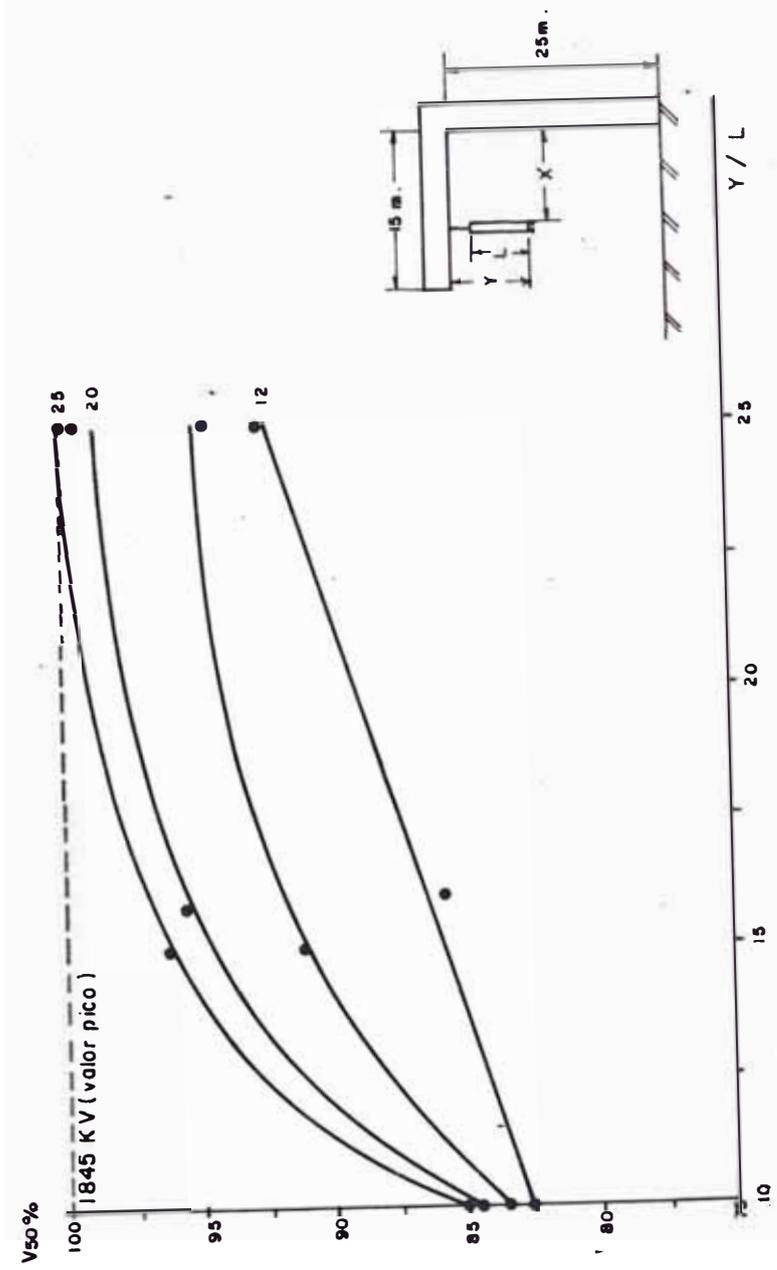
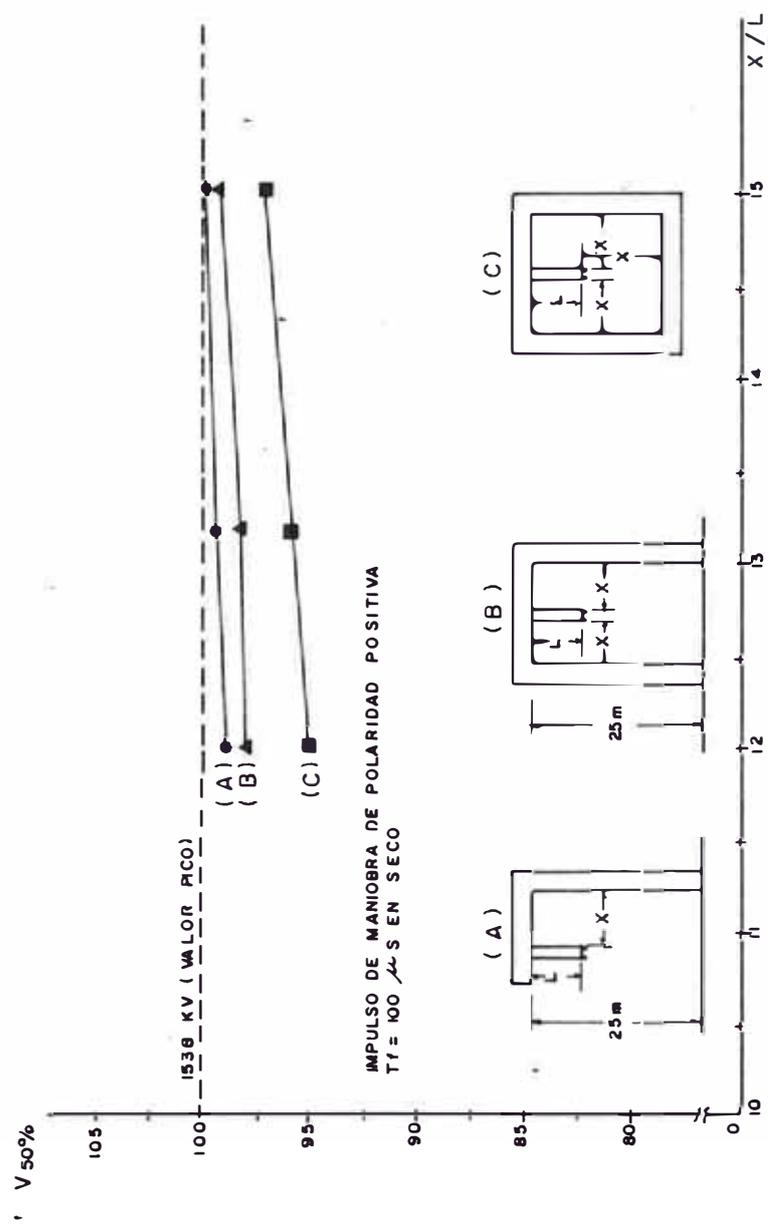


FIGURA N° 18 : INFLUENCIA DE LA FORMA CONSTRUCTIVA DE LA ESTRUCTURA SOBRE EL VOLTAJE DE CONTORNEO DE UNA CADENA DE AISLADORES



CAPITULO III

EL ESFUERZO ELECTRICO SOBRE EL AISLAMIENTO

La posibilidad de un aislamiento de soportar las sollicitaciones dieléctricas impuestas por una sobretensión depende tanto de la amplitud instantánea como de la duración de ésta; es por éello, que tales exigencias se clasifican por la forma de onda de la tensión y no por la causa que los origina, ya que a fin de cuentas es la forma de onda la que determina los esfuerzos sobre el aislamiento.

La IEC TC N°28 clasifica los esfuerzos eléctricos sobre los aislamientos en:

- Tensiones a Frecuencia Industrial, en las condiciones normales de explotación.
- Sobretensiones Temporales
- Sobretensiones de Maniobra
- Sobretensiones de Rayo

Definiendo las Sobretensiones como toda tensión dependiente del tiempo; entre fase y tierra o entre fases, y que tengan un valor pico que exceda el correspondiente valor pico $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ ó $U_m \sqrt{2}$ respectivamente, donde U_m es el voltaje más alto en un sistema trifásico que ocurre bajo condiciones de operación normal. La relación

entre las tensiones nominales y U_m pueden observarse en la tabla N°8.

Es importante señalar que U_m no corresponde a los voltajes transitorios, ni a los voltajes temporarios debido a condiciones anormales del sistema.

Las sollicitaciones normales se caracterizan fundamentalmente por la exigencia que imponen a los aislamientos en cuanto a duración de la misma, mientras que las sollicitaciones anormales, generalmente de corta o muy corta duración se caracterizan por su excesiva amplitud.

El término sobretensiones temporales designa las sobretensiones mantenidas o a las sobretensiones que tienen varias crestas sucesivas, con un decremento de amplitud tal que sean comparables a sobretensiones mantenidas de frecuencia industrial o frecuencia armónica.

Los términos sobretensiones de maniobra o sobretensiones de rayo designando las sobretensiones tales que solo se recoge el valor de cresta más elevado, y que pueden asimilarse en lo referente a sus efectos sobre los aislamientos a los impulsos tipo maniobra normalizados o a los impulsos tipo rayo normalizados, respectivamente. Se han elegido las denominaciones anteriores porque éstos dos tipos de sobretensiones están a menudo, pero no siempre provocadas respectivamente por maniobras en la red o por descargas de rayo.

TABLA N°8

RELACION ENTRE TENSIONES NOMINALES Y MAXIMAS

Tensión Nominal (kV)	Tensión Máxima (kV)
110 - 115	123
132 - 138	145
220 - 230	245
275 - 287	300
330 - 345	362
380 - 400	420
500	525
700 - 750	765

Nota.- Para instalaciones en altitudes mayores a los 1000 m.s.n.m. se debe afectar de un factor de corrección a la tensión máxima, en 1.25% por cada 100 m. de altitud adicionales a los 1000 m.s.n.m., como lo especifica la publicación N°137 IEC.

3.1 Sobretensiones de Maniobra

Se designa bajo el nombre de sobretensiones de maniobra, aquellas que pueden asimilarse a un impulso tipo maniobra de forma normalizada, es decir una onda aperiódica cuyo frente tiene una duración de algunos centenares de microsegundos y la cola del orden de miles de microsegundos.

Estas sobretensiones provienen en general

- De la conexión y del reenganche de una línea.
- De fallas o de su extinción
- Del corte de corrientes capacitivas y de corrientes inductivas medias o débiles.

En lo que sigue vamos a estudiar estas desfavorables circunstancias, teniendo presente que:

Las sobretensiones debidas a conexiones y reenganches presentan una gran importancia para los aislamientos en líneas de 300 kV y superiores, para tensiones inferiores, salvo casos particulares estas sobretensiones tienen menos importancia.

Para ciertos casos poco numerosos de líneas de 52 kV a menos de 300 kV, en el caso de defectos a tierra en redes con neutro a tierra por bobina de extinción, cuando el circuito está subcompensado y en el caso de arcos intermitentes a tierra, pueden aparecer sobretensiones de maniobra importantes en el momento del defecto.

Para todo el espectro de tensiones pueden producirse sobretensiones importantes en casos de fallas a tierra en los circuitos compuestos que comprenden líneas aéreas y transformadores conectados por cables.

Para líneas de 52 kV a menos de 300 kV, las sobretensiones provocadas por el corte de corrientes capacitivas (corte de líneas en vacío, de baterías de condensadores) pueden ser particularmente peligrosas, ya que no siempre se puede suponer la utilización de interruptores sin recebado.

Las sobretensiones debidas a variaciones bruscas de carga pueden comenzar por una sobretensión de maniobra importante y continuar con una sobretensión temporal.

3.2 Función Voltaje - Tiempo de las Sobretensiones por Maniobra

La función voltaje-tiempo correspondiente a sobretensiones por maniobra está constituida por expresiones matemáticas simples solo en el caso de circuitos elementales lineales de parámetros concentrados. Si para mayor sencillez se trata de una única malla, la función resulta oscilatoria amortiguada de frecuencia coincidente con la frecuencia propia del circuito. Si el sistema original queda reducido a dos mallas separadas precisamente por la maniobra de apertura de un interruptor, se tendrá oscilaciones inde-

pendientes en cada malla a la frecuencia propia de cada circuito y obviamente entre bornes del aparato de corte se tendrá una diferencia de potencial que variará en función del tiempo como resultante de las variaciones en cada lado o malla. Este caso ha tenido amplia difusión en la literatura técnica con motivo de las explicaciones formuladas para el caso de las llamadas defectos de línea corta (o de los defectos kilométricos).

Si se trata de un sistema simple pero constituido en parte por una línea de transmisión hay que tener en cuenta que la perturbación que se origina en el punto de maniobra, va a propagarse a lo largo de la línea en función de los valores correspondientes de impedancia de onda y velocidades de propagación, y que se producirán reflexiones y refacciones en los puntos de discontinuidad por lo cual el resultado no es tan fácilmente obtenible.

El problema se dificulta aún más al pasar a la consideración de sistemas eléctricos de mayor complejidad. Felizmente hay que hacer notar, que las influencias de las instalaciones alejadas del punto en el cual se inicia el fenómeno transitorio resultan despreciables debido al alto grado de amortiguamiento real.

La acumulación de informaciones debido al creciente número de estudios realizados, ha sentado las bases

para intentos de tipificación de las funciones voltaje-tiempo en el caso de sobretensiones de maniobra. En un principio se siguieron dos caminos distintos, uno, tendiente a la elección de una oscilación muy amortiguada de frecuencia del orden de 5,000 Hz y con desplazamiento a un lado de la línea de cero; el otro, tendiente a la elección de una onda de impulso representativa de la "semi onda", máxima correspondiente a la irregular oscilación resultante (generalmente la primera o una de las primeras "semi ondas"). En la actualidad toda la atención se dirige hacia la adopción de ondas de impulso.

El comité técnico N°36 de la IEC estandariza la forma de onda en 250/2500 (IEC Publ. 60 High - Voltage Test Techniques), que viene a ser el impulso por maniobra normalizada y es la onda de impulso cuyo tiempo de cresta es 250 u seg. y el tiempo de valor medio es 2500 u seg. (Fig. N°19)

3.2.1 Definiciones Básicas sobre Ondas Impulsionales de Maniobra

Impulso (Impulse)

Es una tensión aperiódica aplicada intensionalmente, usualmente crece rápidamente a un valor pico y luego decrece lentamente hasta cero. La cual es representada por la suma de dos funciones exponenciales.

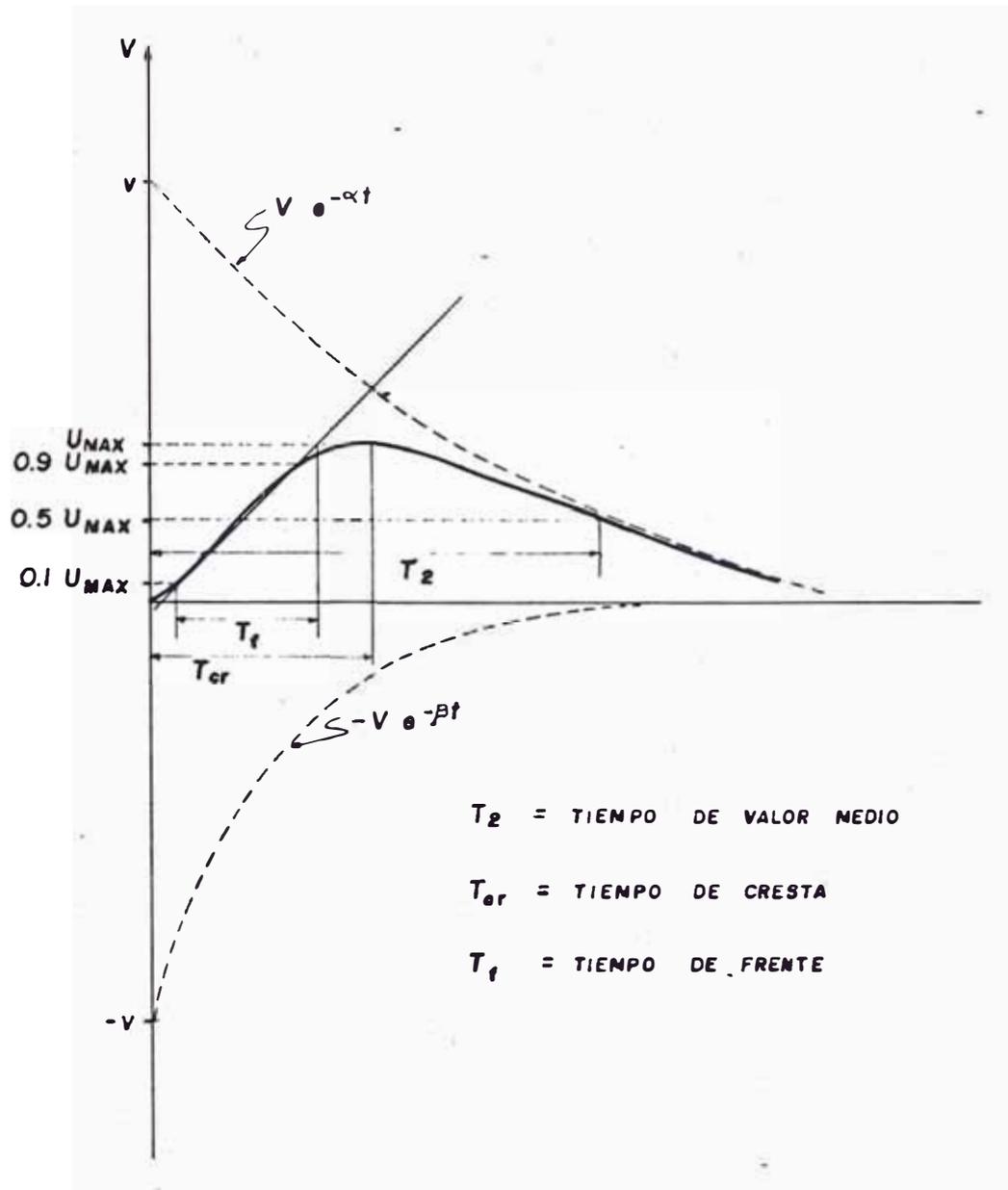


FIG. N° 19. ONDA DE IMPULSO EXPRESADA COMO LA SUMA DE DOS ONDAS EXPONENCIALES

$$V(t) = V_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

Tensión de Impulso Pleno

Es un impulso que no es interrumpido por una descarga disruptiva.

Un impulso pleno está caracterizado por:

- Amplitud
- Polaridad
- Tiempo de frente
- Tiempo de valor medio
- Tiempo de cresta
- Duración sobre 90%

Tiempo de Frente

Si se traza una recta por los puntos correspondientes al 10% y 90% del valor pico, la proyección de esa recta sobre el eje de los tiempos forma, prolongándola hasta ese eje y hasta el valor pico, la duración del frente de onda.

Tiempo de Valor Medio (T_2)

Es el intervalo entre el origen real y el instante en que la cola ha decrecido hasta la mitad de su valor pico.

Tiempo de Cresta (T_{cr})

Es el intervalo entre el origen real y el ins

tante cuando el impulso alcanza su máximo valor.

CAPITULO IV
CONSIDERACIONES PROBABILISTICAS PARA LA EVALUACION DEL
RIESGO DE FALLA

La capacidad de un aislamiento dado para soportar los esfuerzos dieléctricos por la aplicación de un impulso de valor de cresta V , tiene un carácter aleatorio, incluso si se supone que el intervalo de tiempo necesario para la realización de un ensayo dieléctrico es suficientemente pequeño para que las condiciones ambientales y de aislamiento puedan considerarse como constantes, al menos a lo que concierne a los parámetros tales como presión, temperatura, humedad, etc. que pueden medirse y que sirven para definir las condiciones ambientales y de aislamiento durante los ensayos.

La probabilidad de descarga disruptiva de un aislamiento sometido a un impulso de forma y polaridad dadas y de valor de cresta V , consideradas en un corto intervalo de tiempo, como se define anteriormente puede determinarse aplicando el impulso V , sucesivamente N veces en este intervalo de tiempo y contando el número N_1 de descargas. El cociente N_1/N proporciona un valor numérico de esta probabilidad, que será tanto más precisa cuanto mayor sea el número N .

Por otra parte la amplitud V de la sobretensión que aparece en la línea en servicio tiene también un comportamiento aleatorio, por lo cual no se la puede definir determinísticamente, sino mediante una densidad de probabilidad.

La teoría del Riesgo de Falla se basa precisamente en el reconocimiento del carácter estocástico de éstos parámetros.

La probabilidad de defecto para un valor V tomado al azar, es decir, el riesgo de falla R para una causa del tipo considerado será entonces:

$$R = \int_0^{\infty} P(F_0) F(V) dV$$

donde: $F(V) dV$: Probabilidad que aparezcan sobretensiones de amplitudes pico comprendidas entre V y $V + dV$

$P(F_0)$: Probabilidad que ocurre al menos un con -
torneo

La acción de probar una cadena de aisladores a una serie de tensiones iguales, es un experimento aleatorio, que al ser repetido se genera una variable aleatoria.

Generalmente en la generación de las variables aleatorias se supone que los resultados de cada prueba son in

dependientes de los resultados de todas las pruebas anteriores.

En el caso de pruebas con dieléctricos autorecuperables (aire atmosféricos), donde debido al desplazamiento y/o dispersión naturales hacen recuperar la característica dieléctrica original, puede asumirse que las condiciones son siempre las iniciales, es decir la población no guarda memoria de lo que pasó antes.

La aplicación de un impulso de voltaje sobre el objeto de prueba conduce a un contorneo o a un sostenimiento.

Entonces el problema se enmarca dentro de lo que se denomina en estadística una clasificación dicotómica (dividir el conjunto en dos) y clasifica a la población en categorías excluyentes.

Si iguales impulsos de voltaje son aplicados al objeto de prueba, a intervalos de tiempo bastante grandes para asegurar la no influencia de impulsos anteriores se tendrá X contorneos y por consiguiente $(n - X)$ sostenimientos; sobre la asunción que un contorneo solo causa una temporaria pérdida de la rigidez dieléctrica. Si las series de prueba son repetidas con, n , impulsos iguales, que para los hechos en la primera serie, el resultado probable sería un diferente X .

La probabilidad de sostenimiento del aislamiento y la probabilidad de contorneo son complementarias. Sea $P(V)$

la probabilidad de contorneo de un aislamiento, entonces $1 - P(V)$ será la probabilidad de sostenimiento.

La probabilidad de exactamente X contorneos para, n , voltajes aplicados sigue entonces una distribución Binomial.

$$P(X) = \binom{n}{x} P^x(V) [1 - P(V)]^{n-x}$$

$$P(X) = \frac{n!}{x! (n-x)!} P^x(V) [1 - P(V)]^{n-x}$$

donde: $\binom{n}{x}$: coeficiente binomial

n : número de voltajes impulso aplicados

x : número de voltajes impulso que conducen a un contorneo

$P(V)$: probabilidad de contorneo

$P(X)$: probabilidad de exactamente X contorneos cuando n , impulsos son aplicados.

Si hacemos tender al límite la Ley Binomial cuando el número de pruebas " n " tiende al infinito.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \binom{n}{x} P^x(V) [1 - P(V)]^{n-x}$$

Este límite no tiene una solución única, sino que tiene dos soluciones y cada una de esas soluciones está determinada si se parte de un diagrama binomial simétrico

o de un diagrama marcadamente asimétrico.

El grado de asimetría depende de los valores de $P(V)$ y como $P(V)$ es una función de V ; entonces depende del valor pico de la tensión aplicada.

El diagrama será simétrico si:

$$P(V) = 1 - P(V)$$
$$P(V) = \frac{1}{2}$$

Que corresponde a $V = CF_0$, y como ya se vió el valor de tensión que tiene un 50% de probabilidades de producir contorneo.

La distribución es marcadamente asimétrica cuando $P(V)$ tiende a cero.

Cuando se cumple $q'P(V) = 1/2$, el resultado del paso a límite es la función de Gauss. Pero cuando $P(V)$ tiende a cero el paso al límite da la distribución de Poisson.

4.1 Probabilidad de Aparición de Sobretensiones en la Línea

Para poder estudiar estadísticamente el comportamiento de una línea de transmisión es necesario la representación detallada de la red en un ordenador o en analizador transitorio. Las amplitudes de todas las sobretensiones que aparecen en la línea no deben reagruparse en una distribución única, sino que solo

las sobretensiones identificables que tengan una misma causa y aparezcan en un mismo punto pueden considerarse como estadísticamente homogéneas. De hecho, como la severidad de las sobretensiones depende de la forma de onda, asimilada a un impulso de tipo maniobra, un conjunto de sobretensiones no puede considerarse como homogéneo, sino es relativo a los mismos lugares, causas y formas de onda. Sin embargo, las sobretensiones provocadas por una misma causa y que aparecen en el mismo lugar tienen formas parecidas y, por lo tanto, las que en un mismo punto provienen de una misma causa pueden, por razones de simplicidad considerarse como homogéneas.

Al tener las amplitudes de las sobretensiones, en un punto dado un comportamiento estadístico, no se puede definir para caracterizarlas un solo valor. Lo único que se puede indicar es la probabilidad $P(V)$ dV , de que aparezca una sobretensión de valor comprendido entre V y $V + dV$; donde $F(V)$ es la densidad de probabilidad de las sobretensiones provocadas por un tiempo dado de fenómeno.

La probabilidad $F_0(V')$ que se sobrepase el valor V' viene dado por la expresión:

$$F_0(V') = \int_{V'}^{\infty} F(V) \quad dV$$

Asumiendo que $F(V)$ tiene una distribución normal

caracterizada por su media u y su desviación típica σ_0 .

$$F(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{(V-u)^2}{2\sigma_0^2}}$$

Con esta suposición, en la curva de densidad de probabilidad de las sobretensiones, la IEC define un punto de referencia: La Sobretensión Estadística (U_s) que satisface la siguiente relación:

$$\int_{U_s}^{\infty} F(V) \cdot dV = 0.02$$

Es decir el valor pico de sobretensión tipo maniobra con una probabilidad de 2% de no ser excedida (Fig. N°20).

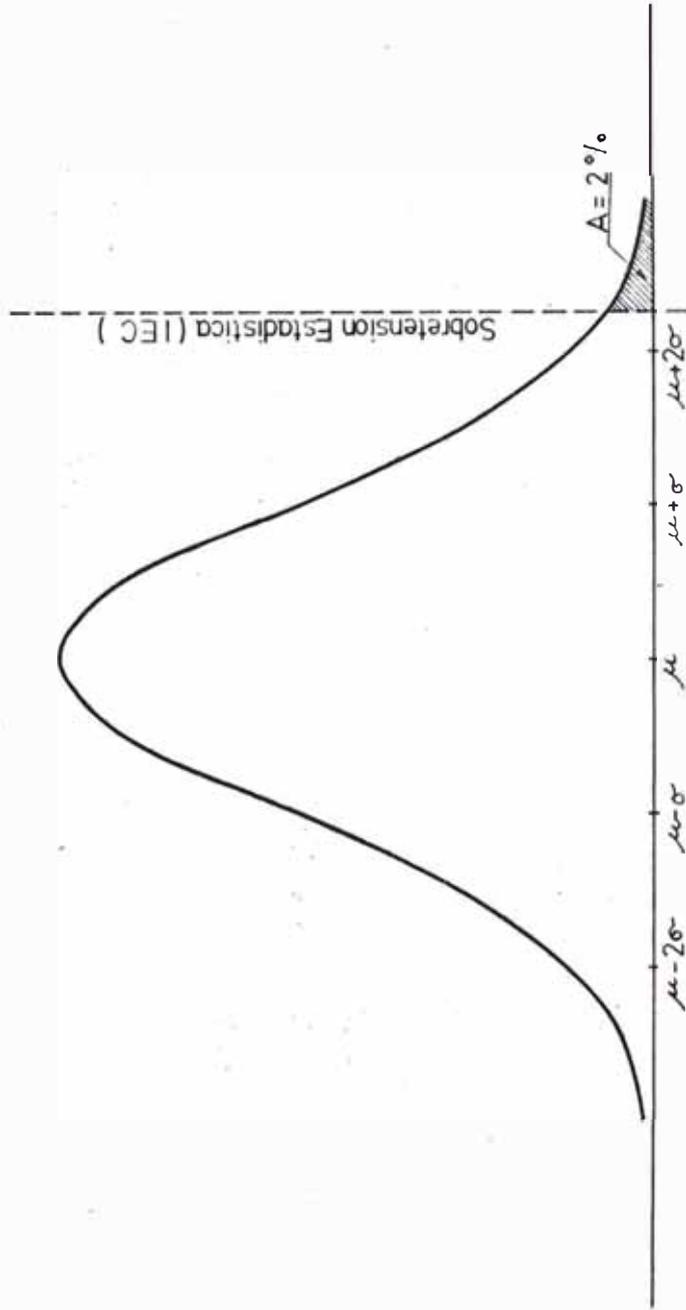
4.2 Probabilidad de Sostenimiento del Aislamiento

Una componente genérica del aislamiento de una línea de transmisión, puede ser caracterizado desde el punto de vista eléctrico por un conductor aislado por un medio dieléctrico; dicha componente genérica la denominaremos como "0".

Si llamamos Ω la población de todas las componentes, 0 de un cierto diseño uniforme.

Si, N , elemento, 0, son extraídos de Ω y están sujetos a un esfuerzo S , un número $n(s)$ de éstos disrum

FIG. N° 20 : DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE SOBRETENSIONES F (v)



pirán.

Lo que permite definir la probabilidad de disrupción $P(s)$ referida al esfuerzo S aplicado a las componentes de Ω ; de la siguiente manera:

$$P(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n(s)}{N}$$

Desde un punto de vista formal, esta definición corresponde al concepto clásico de probabilidad, lo cual es válida cuando los casos posibles (N) son equiprobables, esto significa que ninguno de los elementos de la población, tiene una probabilidad diferente de disrupción.

Esta condición se cumple si se tiene en cuenta que:

- Las componentes de Ω son manufacturados a escala industrial con procedimientos estandarizados.

En la sección de la línea en estudio no existe variaciones significativas de las condiciones atmosféricas.

A estas dos características debe añadirse la propiedad de autorecuperación dieléctrica del aire, que será definida formalmente más adelante.

Si los esfuerzos S , son referidos a su valor de cresta V , $P(s)$ puede ser considerado una función de V y escribiríamos:

$$P(s) = P(v)$$

Generalmente $P(v)$ aumenta con el incremento de V ,

Por lo tanto, es posible definir el valor medio \bar{V} de V .

$$\bar{V} = \int_0 \quad v \frac{dP}{dv} \cdot dv$$

la desviación estándar

$$\sigma(V) = \left[\int_0 \quad v^2 \frac{dP}{dv} \cdot dv - \bar{V}^2 \right]^{1/2}$$

Y el valor V que causa disrupción en el 50% de las pruebas. En el instante en que ocurre la prueba, cada componente 0 de Ω tiene un valor X disruptivo (para el esfuerzo S). En este caso X es una variable Random que depende del tiempo y la función de distribución de X , esto es, la probabilidad que 0 elegido aleatoriamente en Ω disrumpa a un valor X menor que V .

$$P(X < V) = P(V)$$

$P(V)$ es la llamada función distribución de la variable Random X . Como X es una variable Random del tiempo, llamaremos V_0 su valor medio.

$$X = (X - V_0) + V_0$$

Las variables $(X-V_0)$ y V_0 son variables aleatorias también llamaremos sus desviaciones estándar $\sigma_0(X)$ y $\sigma(V_0)$ y sus distribuciones de $G(X-V_0)$ y $H(V_0)$ respectivamente, además las distribuciones de $(X-V_0)$ y V_0 son independientes.

La probabilidad que la componente 0, tenga un valor de disrupción medio en el intervalo Z y $Z - dz$ es:

$$dp = \frac{dH}{dz} \cdot dz$$

La probabilidad que la misma componente falle a un valor de cresta V es:

$$G(V - Z)$$

La probabilidad que esta componente falle a un valor de cresta V , teniendo un valor medio de disrupción en el intervalo Z y $Z + dz$ es:

$$G(V-Z) \frac{dH}{dz} \cdot dz$$

Por consiguiente la distribución de probabilidades de disrupción será:

$$P(X < V) = P(V) = G(V-Z) \cdot \frac{dH}{dz} \cdot dz$$

$$y \quad \sigma(V) = \left[\sigma_0^2(X) + \sigma^2(V_0) \right]^{1/2}$$

Cuando la componente 0 es el "tipo aleatorio"

$$\sigma_0(x) \gg \sigma(v_0)$$

$$\sigma(v) = \sigma_0(x)$$

$$P(X < V) = P(V) = G(V - \bar{V})$$

En este caso el resultado de pruebas obtenidas por muchos ensayos sobre componentes simples 0 corresponde a la misma distribución $P(V)$, para una sola prueba ya que el porcentaje de disrupciones es el mismo para todas las pruebas.

Una componente del tipo aleatorio caracteriza un dieléctrico autorecuperable, como es el caso del aire. Las componentes autorecuperables, se caracterizan porque las propiedades del aislamiento no están dañadas por la disrupción.

La distribución de probabilidades de disrupción experimentalmente se ha demostrado que corresponde a una distribución normal, de acuerdo con ello, la probabilidad de disrupción referida a un impulso de amplitud pico V puede ser calculado utilizando la ecuación de la distribución normal:

$$P(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(V)} \int_{-\infty}^V e^{-\frac{(x-\bar{V})^2}{2\sigma^2(V)}} dx$$

En laboratorio, usando los métodos descritos en el Capítulo IV, es posible determinar la curva de densidad de probabilidad de disrupción como una función del valor de cresta;

$$P(V) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^V e^{-\frac{(x-CFO)^2}{2\sigma_f^2}} dx$$

Donde, CFO es el parámetro que define la posición de la curva de probabilidad y estima a su vez a V. La desviación típica de la distribución, definida como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones con relación a la media; es el parámetro elegido para expresar la dispersión, es estimado por σ_f .

Los análisis con impulsos de polaridad positiva conducen a un valor $\sigma = 5\%$, para una forma de onda próxima a la crítica. Es necesario indicar que la desviación estándar para pruebas de maniobra en aislamiento de aire, recomendado por la IEC es $\sigma = 6\%$.

Sobre la curva de probabilidad de disrupción es conveniente con fines de estandarización, definir el Sostentamiento Estadístico (U_w), es decir aquel valor de tensión que tiene un 90% de probabilidad de sostentamiento o sea un 10% de probabilidad de disrupción. (Fig. N°21).

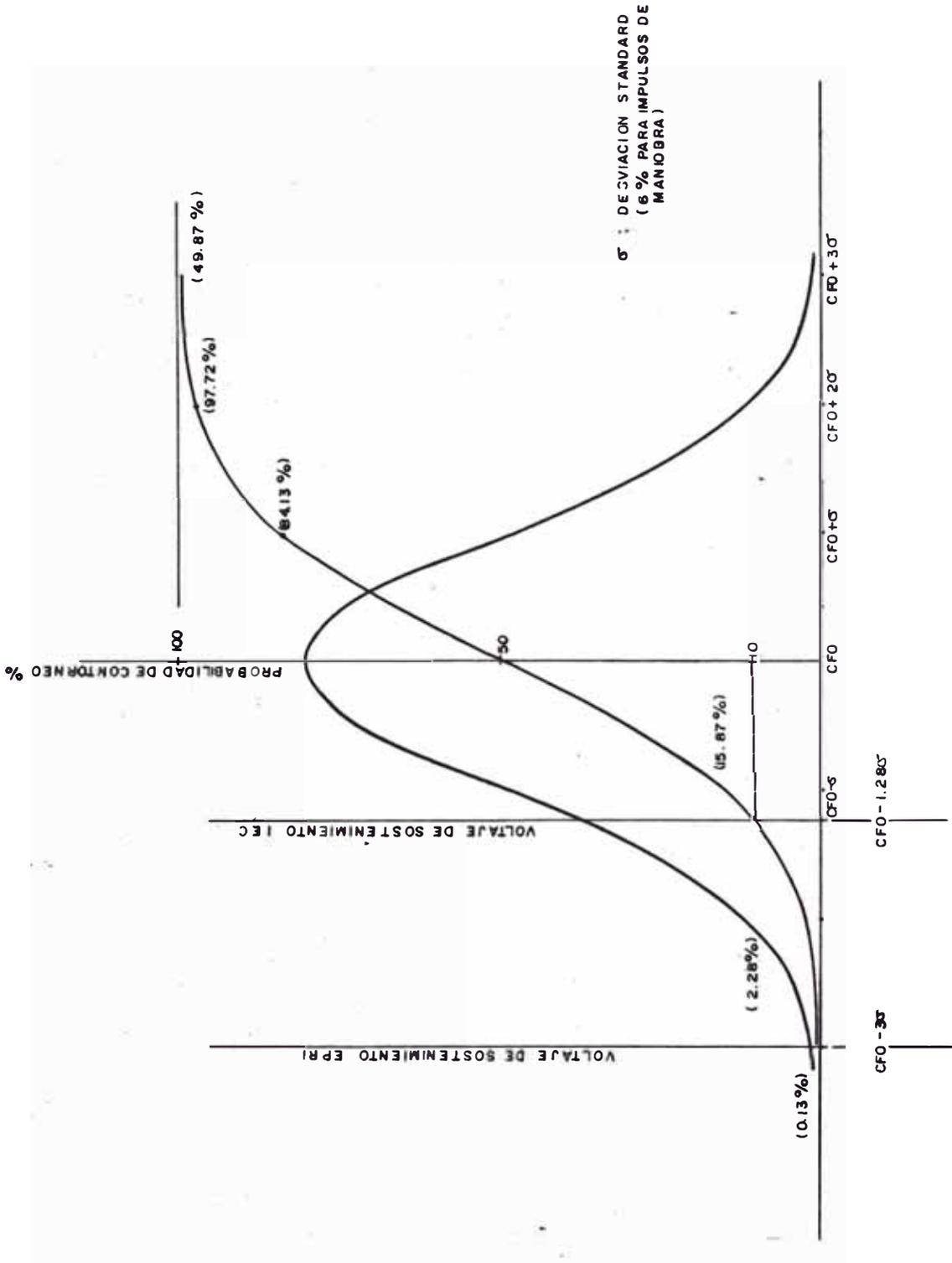


FIG. N°21: RELACION ENTRE CFO Y EL VOLTAJE DE SOSTENIMIENTO

4.2.1 Probabilidad de Disrupción de dos Brechas en Paralelo

Para el estudio del problema de dos brechas conectadas en paralelo se considerará el caso de una de ellas más corta que la otra (0_1 , 0_2).

Si suponemos que los retardos en el cebado de los aislamientos siguen una Ley de Gauss, cualquiera que sea el valor de cresta de la onda aplicada:

$$f_i = \frac{1}{d_i \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\bar{t}} e^{-\frac{(u-T_i)^2}{2 d_i^2}} du$$

donde:

T_i = valor 50% del retardo en el cebado del aislamiento 0_i del valor de cresta V de la onda aplicada (Fig. N°22)

d_i = desviación estándar del retardo en el cebado del aislamiento 0_i en función del valor de cresta V de la onda aplicada (Fig. N°22).

Entonces, la probabilidad P^* , que el aislamiento 0_2 se debe antes que el aislamiento 0_1 es:

$$P^* = \frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{T_2 - T_1}{d_1^2 + d_2^2}} e^{-t^2} dt$$

La probabilidad que disrumpa 0_2 cuando 0_1 y 0_2 están en paralelo es por consiguiente:

$$P^{(2)}(V) = P_2(V) (1 - P_1(V)) + P^* P_1(V) P_2(V)$$

La probabilidad de descarga del aislamiento 0_1 es:

$$P^{(1)}(V) = P_1(V) (1 - P_2(V)) + (1 - P^*) P_1(V) P_2(V)$$

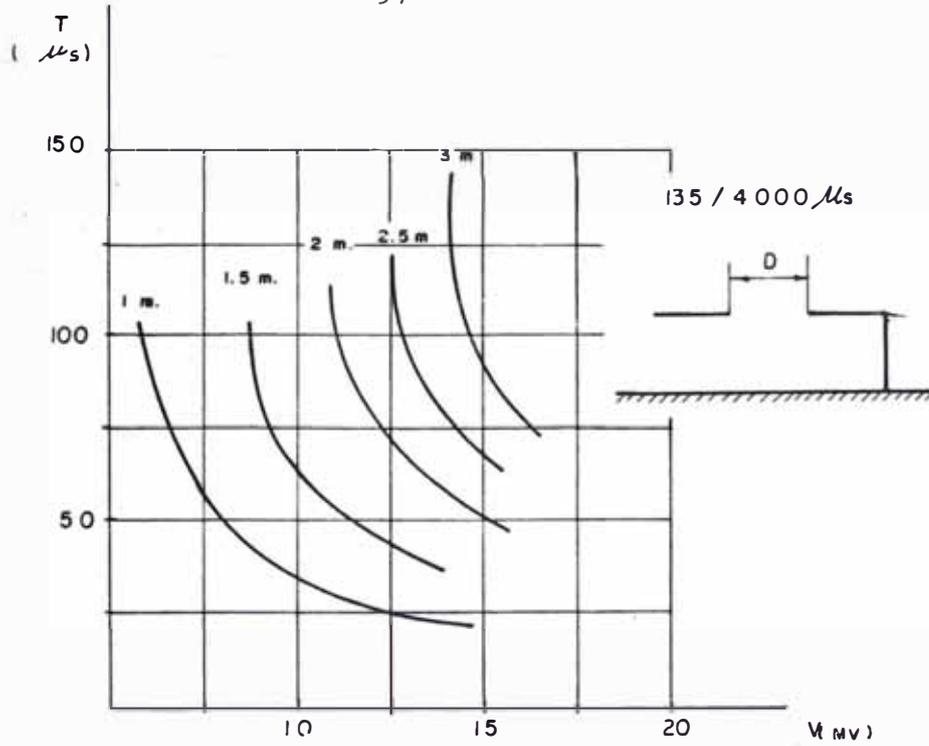
Y la probabilidad que no ocurra disrupción es:

$$P_N(V) = (1 - P_1(V)) (1 - P_2(V))$$

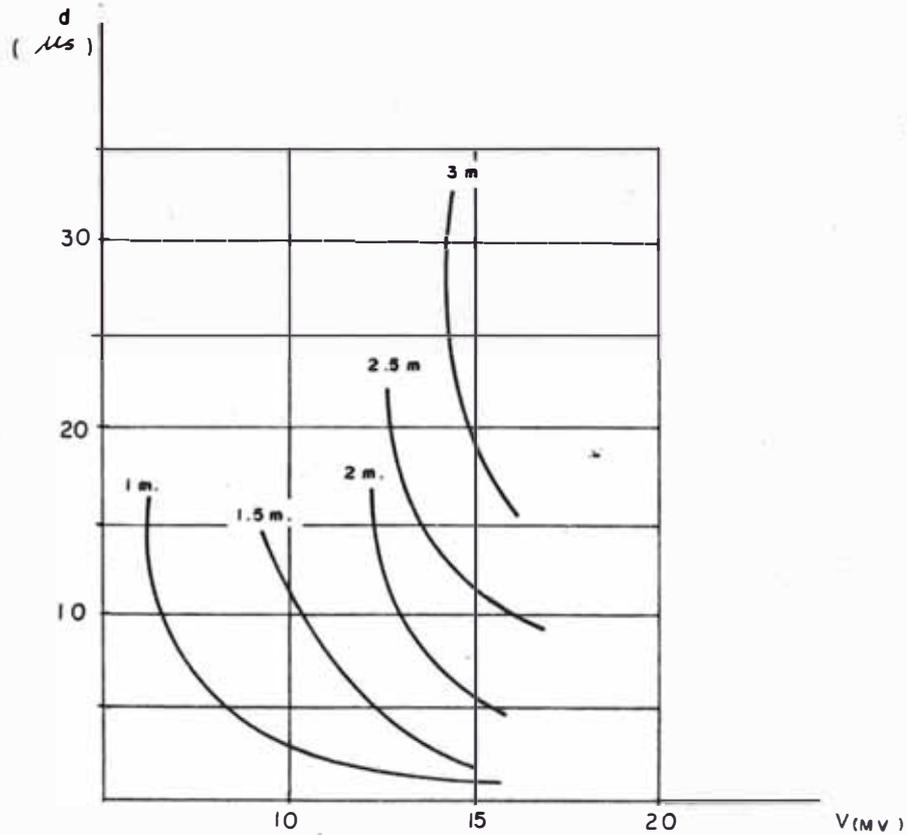
Como es obvio:

$$P^{(1)}(V) + P^{(2)}(V) + P_N(V) = 1$$

La dependencia entre el tiempo de disrupción (T) y la desviación estándar con el valor de cresta del voltaje aplicado se muestran en la Fig. N°22.



- TIEMPO DE DISRUPCION T COMO FUNCION DEL VALOR DE CRESTA DEL VOLTAJE



- DESVIACION STANDARD DEL TIEMPO DE DISRUPCION COMO FUNCION DEL VALOR DE CRESTA DEL VOLTAJE APLICADO

FIGURA N° 22

4.2.2 Probabilidad de Disrupción para Brechas Múltiples en Paralelo

En la sección anterior se analizó el caso de dos brechas 0_1 y 0_2 en paralelo, pero donde las brechas son de diferentes longitud y que corresponde al modelo que se emplea para analizar el rol protector de los descargadores.

Para este sistema, la probabilidad que no ocurra disrupción, es decir la probabilidad de sostenimiento es:

$$P_N(V) = (1 - P_1(V)) (1 - P_2(V))$$

Como ya se dijo, el aislamiento de la línea consiste de n partes 0_i ($i = 1, 2 \dots n$) de similares características.

Luego:

$$P_1(V) = P_2(V) \quad P_N(V) = P(V)$$

Entonces para el caso anterior si $0_1 = 0_2$

$$P_N(V) = (1 - P(V))^2$$

4.2.3 Distribución del Sostenimiento sin Atenuación

Si la probabilidad de sostenimiento para un esfuerzo de voltaje dado, caracterizado por su valor de cresta V , en una brecha de aire es $W(V)$ y dado que la probabilidad de dis-

rupción puede ser expresado como una función de la probabilidad de sostenimiento.

$$P_i(V) = 1 - W_i(V)$$

Y teniendo en cuenta, además que la disrupción de los aislamientos son eventos aleatorios independientes y no correlacionados, es decir, el éxito de un evento no es influenciado o condicionado por la ocurrencia o no de los otros.

La probabilidad de ocurrencia de sostenimiento para las, n brechas en paralelo (W_N) es:

$$W_N = \prod_{i=1}^n W_i(V)$$

donde: $W_N = P(W_1 \cap W_2 \dots \cap W_n) = P\left(\bigcap_{i=1}^n W_i\right)$

$$W_N = \prod_{i=1}^n (1 - P_i(V))$$

La probabilidad de disrupción para estas mismas n brechas en paralelo P_N es:

$$P_N = P(P_1 \cup P_2 \dots \cup P_n) = P\left(\bigcup_{i=1}^n P_i\right)$$

Sabemos por teoría de probabilidades que:

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n P_i\right) = 1 - P\left(\bigcap_{i=1}^n W_i\right)$$

$$P_N = 1 - W_N$$

Entonces:

$$P_N = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(V))$$

La strength distribution se define como la probabilidad que ocurre disrupción en 0_1 u 0_2 u u 0_n u en todos; que para el caso de no considerar atenuación la denominaremos

$P(F_0)$

$$P(F_0) = 1 - [1 - P(V)]^n$$

En esta ecuación se observa que en una determinada longitud de línea, la probabilidad de que se produzca una descarga en por lo menos uno de los aislamientos, aumenta en forma exponencial con el número de aislamientos considerado en esa longitud. O lo que es lo mismo la probabilidad de sostenimiento de esa longitud de la línea de transmisión decrece con el número de brechas en paralelo, para un sobrevoltaje dado.

En la tabla N°9 se encuentran indicados los valores obtenidos de la ecuación de $P(F_0)$, es decir:

$$P(F_0) = 1 - \left[1 - P\left(\frac{x - CFO}{\sigma}\right) \right]^n$$

Algunos de estos valores pueden observarse en la figura N°23.

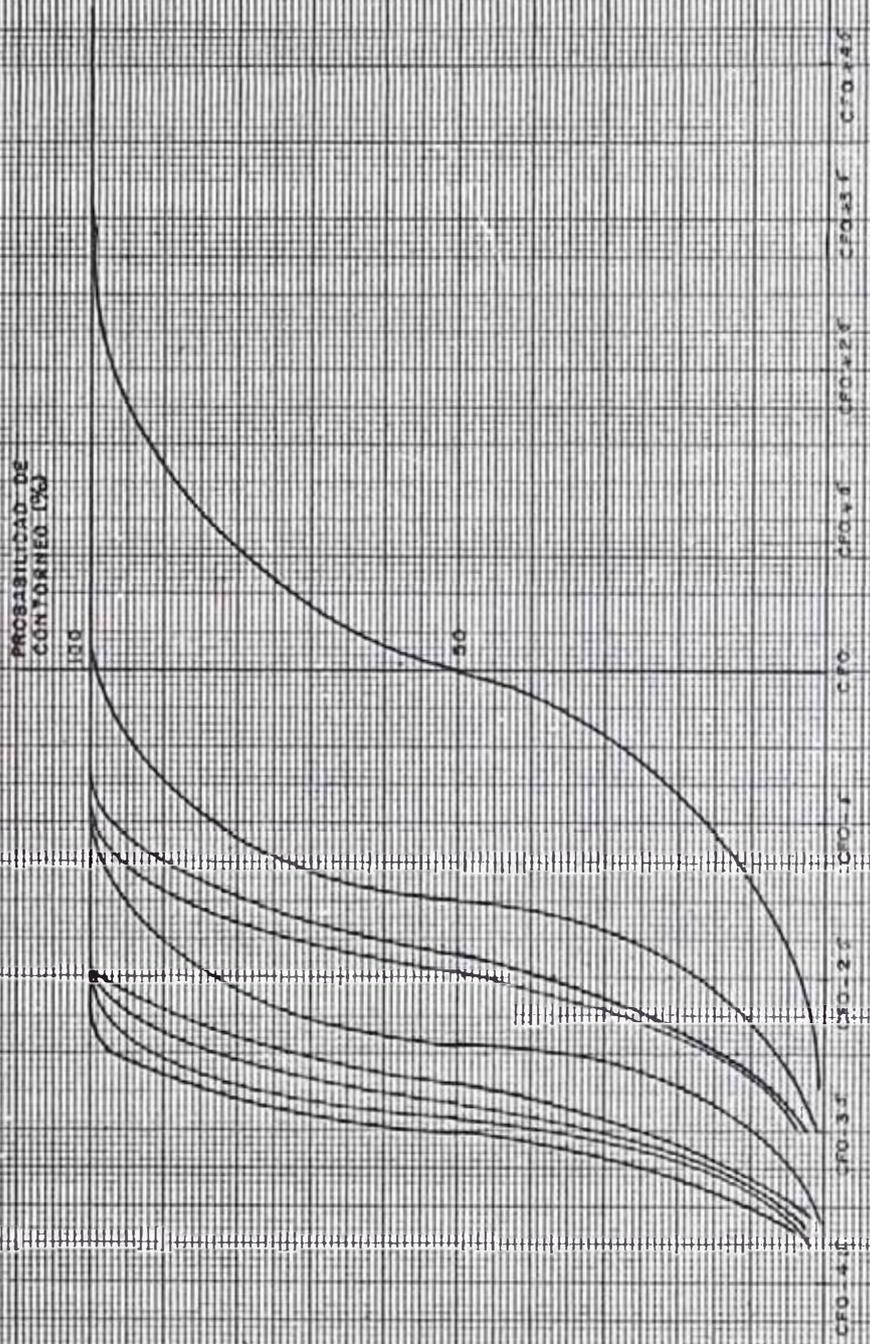


FIGURA N° 23 FUNCION DE DISTRIBUCION DEL SOSTENIMIENTO SIN CONSIDERAR EL EFECTO DE ATENUACION $P(f_0)$ DE ONDA.

4.2.4 Métodos de Pruebas de Contorneo

La determinación de la probabilidad de disrup
ción o sostenimiento como una función del va-
lor de cresta del impulso de voltaje aplicado
puede ser hecha por diferentes procedimientos
en el laboratorio. Pero teniendo presente que
de los ensayos que en él se realicen no puede
obtenerse solo estimaciones mas o menos preci
sas de los verdaderos valores de la tensión
soportada del material.

Las tensiones de los ensayos tipo maniobra de
polaridad positiva se definen por el valor de
cresta prevista de los impulsos de forma nor-
malizada.

Los métodos de ensayo estadísticos recomenda-
dos por la IEC son:

- Ensayo de Descarga Disruptiva 50%
- Ensayo de Tensión soportada bajo 15 impulsos

El primero se realiza a tensiones de impulso
superiores a la tensión nominal soportada a
los impulsos, con un método y número de impul
sos tales que la tensión de descarga disrupti
va 50% se determine con una precisión acepta-
ble. Debido a que son necesarios muchas des-
cargas disruptivas, este ensayo solo es ade-
cuado para aislamientos autorregenerables.

El segundo se realiza aplicando 15 impulsos de forma normalizada a la tensión soportada nominal. Si el número de descargas disruptivas en el aislamiento autorregenerable no excede de dos, y no se produce ninguna descarga disruptiva en las partes no autorregenerables del aislamiento, se considera que el aislamiento del material ha pasado el ensayo con éxito.

El ensayo de descarga disruptiva 50% puede realizarse por varios métodos posibles y uno cualquiera puede usarse a condición que la precisión obtenida sea mejor que una semi-desviación típica con un grado de confianza del 95%. Se puede decir que se tienen 95 probabilidades sobre 100 de tener razón afirmando que la tensión disruptiva 50% del objeto de prueba en el momento del ensayo se encuentra comprendido entre los límites dados por el valor estimado en el ensayo, aumentado o disminuido en una semi-desviación típica.

Un método que satisface esta exigencia es el método de Up-And-Down.

La precisión del ensayo de tensión soportada con 15 impulsos es considerablemente menor. Los límites de confianza al 95% para la pro-

bilidad de descarga, son en este ensayo:

Para 0 descargas aproximadamente 0 á 0.213

Para 1 descarga aproximadamente 0 á 0.32

Para 2 descargas aproximadamente 0.015 á 0.40

Para 3 descargas aproximadamente 0.045 á 0.48

Para 4 descargas aproximadamente 0.08 á 0.54

Para 5 descargas aproximadamente 0.12 á 0.61

Se ve que para un intervalo de confianza de 95%, un ensayo con solamente 15 impulsos no permite deducir que la probabilidad de descarga es inferior a 0.10 o que la probabilidad de soportar la tensión es superior a 0.90, incluso para 0 descargas. Cuando el número de descargas sobrepasa 4, el ensayo es significativo para probar la hipótesis de que la probabilidad de soportar esa tensión es inferior á 0.90.

El método Up-And-Down permite la directa evaluación de la tensión 50% sin requerir la determinación de la probabilidad para diferentes valores de voltaje; pero este método no es adecuado para la determinación de la desviación estándar, la cual debe ser asumida.

4.3 Probabilidad de Falla en las Líneas Eléctricas

Las fallas en las líneas eléctricas pueden tener lugar si aparecen sobretensiones y una cadena contornea; estos dos eventos son independientes y cada uno se adopta a una curva de probabilidad.

La tensión soportada de un elemento aislante en un intervalo de tiempo ΔT está definida por la probabilidad de interrupción bajo una sobretensión $P(F_0)$.

Asimismo, la distribución de sobretensiones está definida por la densidad de probabilidades $F(V)$, la probabilidad que puede producirse una sobretensión comprendida entre V y $V + dV$ es entonces $F(V) dV$.

Debido a que las sobretensiones pueden ser de polaridad positiva a negativa, el espacio muestral de sobretensiones S será particionado en dos subconjuntos:

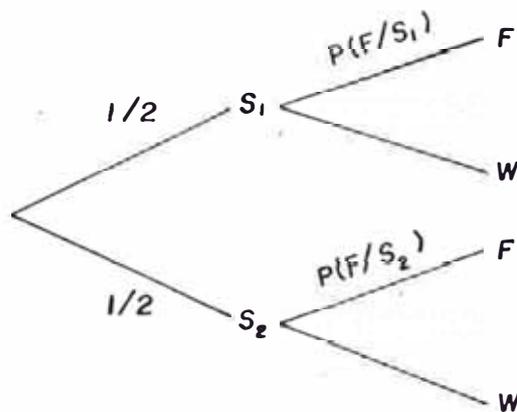
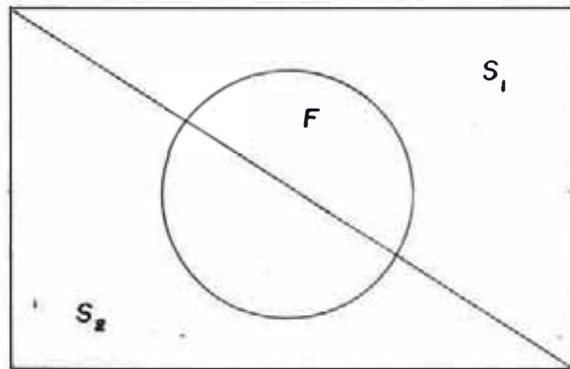
S_1 : La sobretensión es de polaridad positiva

S_2 : La sobretensión es de polaridad negativa

Como S_1 y S_2 no pueden verificarse juntos, entonces

$$P(S_1 \cap S_2) = 0$$

Denominaremos F , el evento asociado a la interrupción y W , el evento asociado al sostenimiento, los cuales pueden verificarse tanto con ondas positivas, como negativas. (Fig. N°24).



$$P(F) = P(F/S_1) \cdot P(S_1) + P(F/S_2) \cdot P(S_2)$$

FIG. N° 24: DIAGRAMA DE VENN PARA EL CALCULO DE LA PROBABILIDAD DE FALLAS EN LAS LINEAS ELECTRICAS AEREAS.

Entonces, la probabilidad de ocurrencia del evento F será:

$$P(F) = P(F/S_1) P(S_1) + P(F/S_2) P(S_2)$$

Que viene a ser la probabilidad de una disrupción como mínimo en N, aislamientos bajo la acción de una densidad de esfuerzos eléctricos por maniobra.

$$P(S_1) = P(S_2) = \frac{1}{2}$$

$$P(F) = \frac{1}{2} \cdot P(F/S_1) + \frac{1}{2} \cdot P(F/S_2)$$

En esta expresión debido a que el segundo sumando depende del sostenimiento a las ondas de polaridad negativa, para algunas configuraciones y bajas condiciones normales es generalmente omitido debido al hecho que el sostenimiento a las sobretensiones de polaridad positiva es más baja que para polaridad negativa.

$$P(F) = \frac{1}{2} P(F/S_1)$$

$$P(F/S_1) = P(F_0) \quad F(V) \, dV$$

En el caso de cadena de aisladores de suspensión en líneas de alta tensión.

$$P(F/S_1) = P(F/S_2)$$

Entonces:

$$P(F) = P(F_0) \cdot F(V) \, dV$$

$P(F)$ es lo que se denomina riesgo de falla en el intervalo V y $V + dV$

$$d_R = P(F_0) \cdot F(V) \, dV$$

El riesgo total de falla para la familia aleatoria de sobrevoltaje debido al tipo de evento considerado (S) es por integración de la expresión anterior, para todos los valores de V .

$$R = \int_0^{\infty} P(F_0) \cdot F(V) \cdot dV$$

$$R = \int_0^{\infty} F(V) \cdot [1 - (1 - P(V))^N] \, dV$$

Los cálculos se harán admitiendo que las leyes que representan las distribuciones reales de sobretensiones y probabilidad de disrupción del aislamiento son Gaussianas, luego sobre ambas características se definió un punto correspondiente a una probabilidad de referencia dada. A partir de ello se establecerá una correlación entre el riesgo de falla y el margen a respetar entre estos dos valores; el cual es definido como el factor de seguridad estadístico:

Factor de Seguridad Estadístico (γ)

Para un tipo dado de evento, viene a ser la relación entre el sostenimiento estadístico (U_w) y el sobre - voltaje estadístico (U_s) establecidos sobre la base de un riesgo de falla dado.

$$\gamma = \frac{U_w}{U_s}$$

CAPITULO V

EVALUACION DEL RIESGO DE FALLA EN LOS AISLAMIENTOS BAJO CONDICIONES DE PARAMETROS ESTANDAR IEC

La conducta estadística de los aislamientos, obtenida de las pruebas de laboratorio será usada para determinar el comportamiento del aislamiento de una línea de transmisión cuando se encuentra en una atmósfera que tiene los valores de presión, humedad y temperatura iguales a los estándar IEC. Para cuantificar esta conducta se cuentan en la actualidad con dos métodos, uno de ellos que requiere del empleo de técnicas de integración numérica, para el cual es necesario del auxilio de una computadora y al cual lo denominaremos "Método Computacional" y el otro que solo requiere el empleo de tablas que lo llamaremos "Método Aproximado".

El modelo matemático que sirve de base a estos métodos es deducido teniendo en cuenta que los aislamientos son iguales entre sí, en la sección de la línea en estudio, ya que la forma constructiva de la torre influye en el sostenimiento eléctrico.

Se emplea como parámetro representativo de la curva de probabilidad el voltaje mínimo disruptivo (Critical Flashover Voltage), debido a que es un valor fácilmente

obtenible de la información proporcionada por los fabricantes de aisladores.

Para simplificar el modelo no se considerará el efecto de atenuación del impulso de tensión a lo largo de la línea, debido a la impedancia de ésta.

Así mismo, se admite ciertas hipótesis sobre la forma matemática de las Leyes que representan las distribuciones reales de sobretensiones y probabilidades de descarga de aislamientos, es decir, admitiendo que estas leyes son Gaussianas con una desviación típica de valor conocido, este valor para ondas de maniobra de polaridad positiva y con tiempos de frente próximos al valor crítico; deducido de los resultados de las pruebas de laboratorio es 5%.

5.1 Método Computacional para la Evaluación del Riesgo de Falla

Como ya se vió, para evaluar el Riesgo de Falla es necesario integrar el producto de la probabilidad acumulada de sostenimiento por la densidad de probabilidad de esfuerzos eléctricos; como en cualquier proyecto de integración numérica la integral tiene que ser truncada en algún punto. Desde que la curva de probabilidad de sobretensiones y de sostenimiento son Gaussianas, razonable asumir los puntos de truncamiento a "n" veces la desviación estándar; el número n puede ser tomado 4 ó 5 con los cuales se obtendrían

resultados satisfactorios. Esta consideración se ha tenido en cuenta en la formulación del algoritmo computacional.

En general, para el análisis de los aislamientos en condiciones ambientales naturales, los parámetros que definan estas condiciones ambientales deben ser datos de entrada (Fig. N° 25). Pero en el caso de condiciones estándar solamente es necesario como datos de entrada al programa:

- La tensión 50% CF0
- El promedio de las sobretensiones U
- La desviación estándar de U GS
- El número de cadenas de aisladores N

La tensión 50% y la sobretensión promedio para ingresar como datos del programa, deben ser expresadas por sus correspondientes valores por unidad; para ello, la tensión base a tomar será la recomendada por la IEC:

$$UMB = UM \sqrt{2} / \sqrt{3}$$

Donde UM es la tensión máxima para equipamiento.

El algoritmo computacional está formulado en lenguaje FORTRAN, y consta de un programa principal tiene un subprograma denominado RISK, que es el que se encarga de evaluar la integral del producto de convolu

ción. El subprograma RISK tiene a su vez tres subprogramas FUNCTION: F, PF, TRAP; el primero de los cuales calcula los puntos de la distribución de sobretensiones, el segundo lo hace de los puntos de la curva acumulada de sostenimiento y el tercero, utilizando operaciones lógicas aplica la regla de Simpson para Integrales. (Fig. N°s 26, 27, 28, 29, 30)

Los valores de salida del programa son el riesgo de falla y el factor de seguridad estadístico, definido por la IEC.

5.2 Método Aproximado para la Evaluación del Riesgo de Falla

Una técnica alternativa para computar la probabilidad de contorno de N aislamientos consiste en invertir el orden en el cual es efectuado el cálculo. La probabilidad de contorno P_s para un solo aislamiento al cual se aplica cierta distribución de sobretensiones es:

$$P_s = \int_0^{\infty} F(V) P(V) dV$$

Asumiendo distribuciones normales para $F(V)$ y $P(V)$, entonces P_s puede ser escrita como:

$$P_s = 1 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Y e^{-z^2/2} dz = \frac{1}{2} \left[1 - e^{-rf\left(\frac{Y}{\sqrt{2}}\right)} \right]$$

donde:

$$Y = \frac{CFO - u}{\sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_o^2}}$$

La probabilidad total de contorneo P'_{tot} para N aislamientos viene dada por la siguiente expresión:

$$P'_{tot} = 1 - (1 - P_s)^N$$

Desde que P_s puede ser obtenida usando tablas de la función Error, este método no requiere el empleo de un computador.

Si la probabilidad de un aislamiento individual $P(V)$ es pequeña, el número de aislamientos en paralelo no muy elevado, se tiene:

$$P_{tot} \approx P'_{tot} \approx NP_s$$

La IEC, por otra parte, en base a los parámetros antes definidos, como son: La Sobretensión Estadística y el Sostenimiento del aislamiento; así como también, en base también a la última ecuación propuesta da un método al cual denomina Método Estadístico Simplificado, el cual para ser aplicado requiere del empleo de la Fig. N° 31 y de la siguiente ecuación:

$$P_{tot} \approx NR$$

Esta figura solamente es aplicable en las condiciones de laboratorio y nos da la correlación media entre el coeficiente de seguridad estadístico y el Riesgo de Falla, así como las envolventes superior e inferior de las correlaciones obtenidas al tomar las nueve distribuciones de sobretensiones que resultan de tomar todas las combinaciones posibles de los valores de la desviación típica y del punto donde las curvas de probabilidad están truncadas en su parte superior.

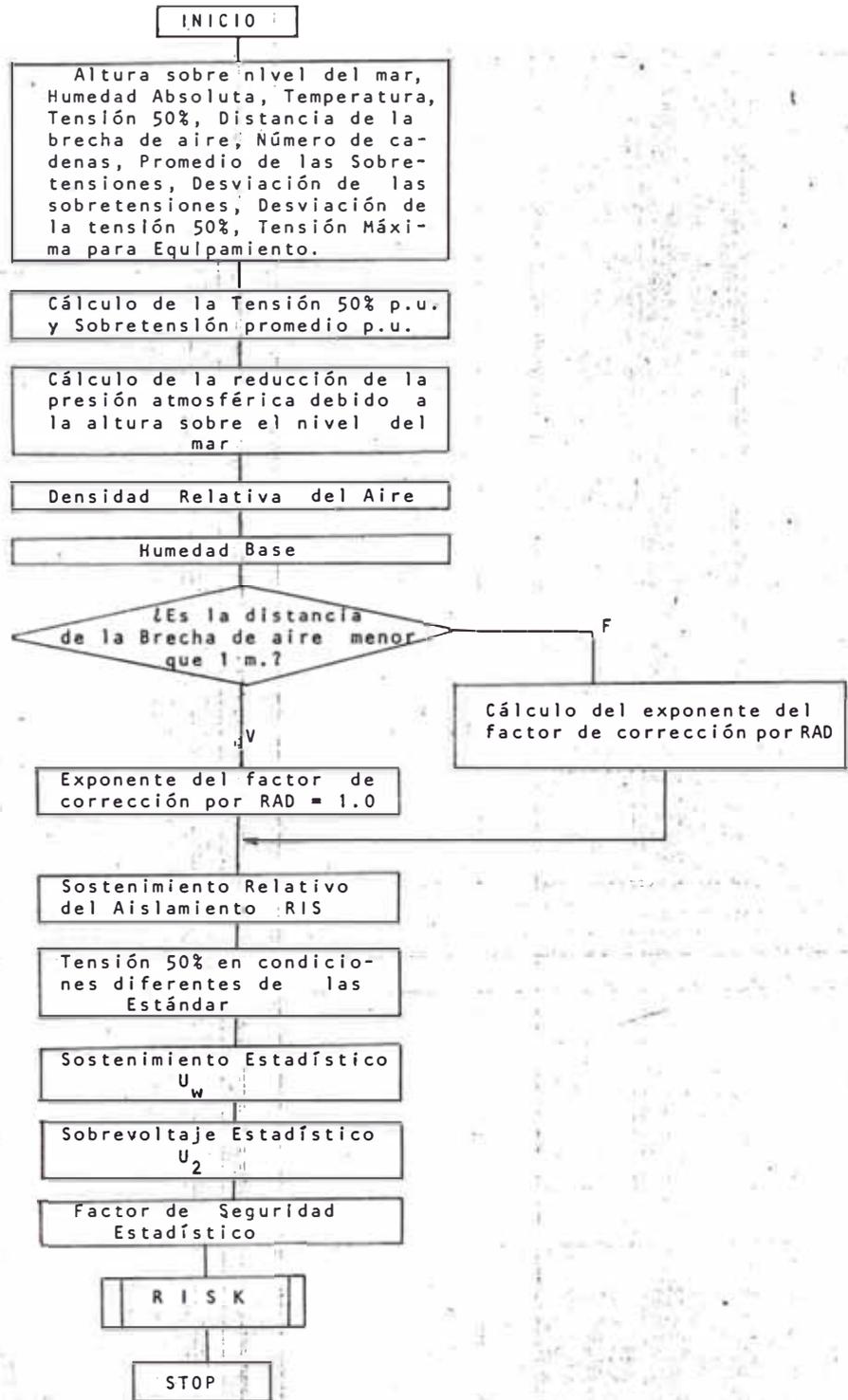


FIG. N°25.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA ANALISIS DE LOS AISLAMIENTO EN CONDICIONES AMBIENTALES NATURALES

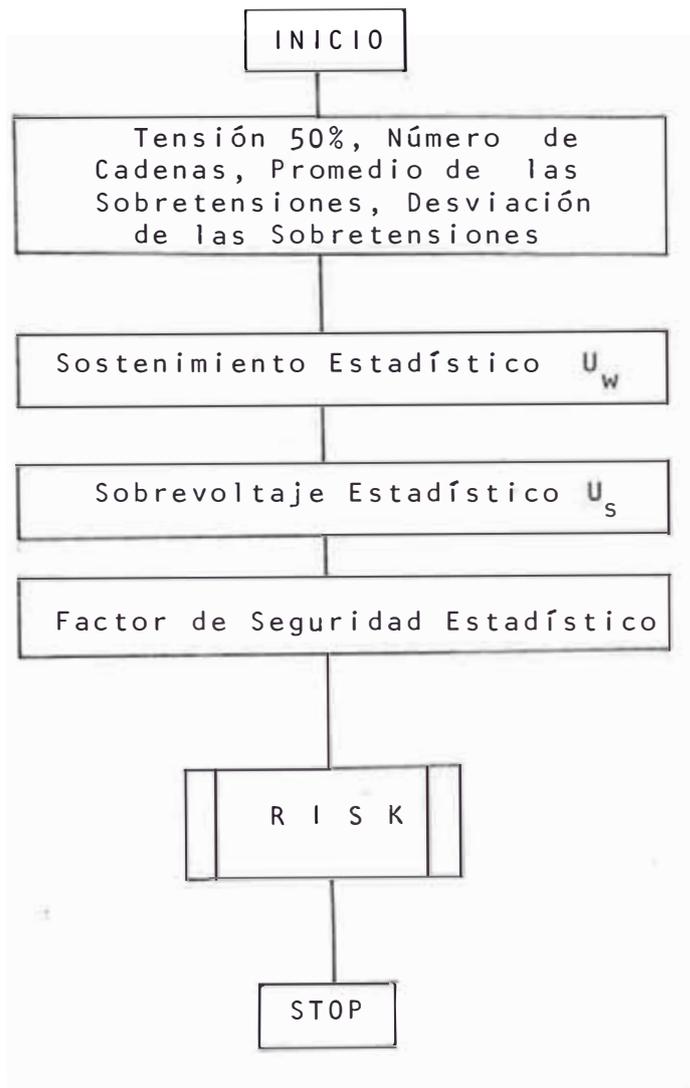


FIG. N°26.- DIAGRAMA DE FLUJO PARA ANALISIS DE LOS AISLAMIENTOS EN CONDICIONES ESTANDAR.

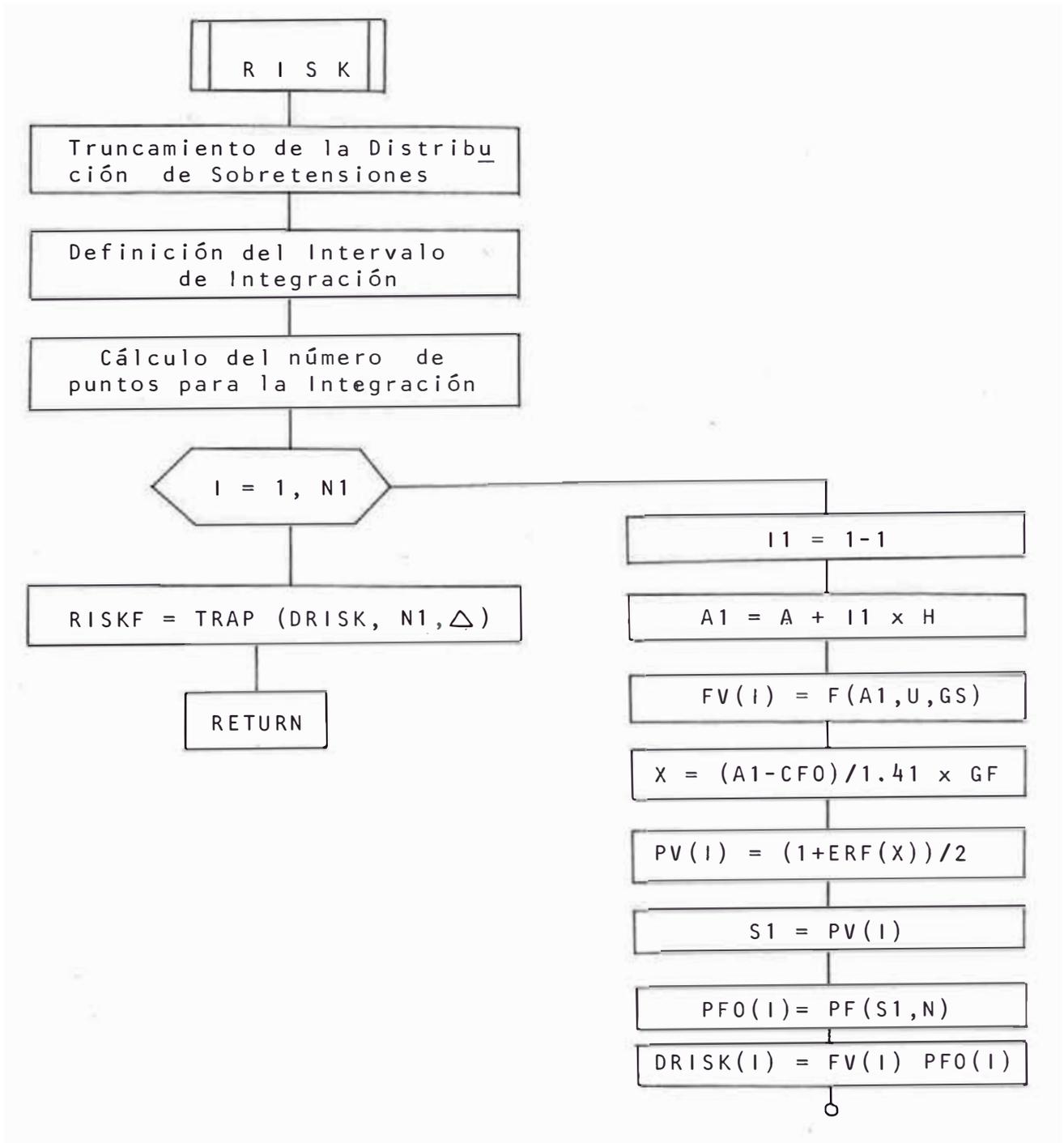


FIG. N°27.- SUBPROGRAMA SUBROUTINE RISK QUE EVALUA LA INTEGRAL DEL PRODUCTO DE CONVOLUCION

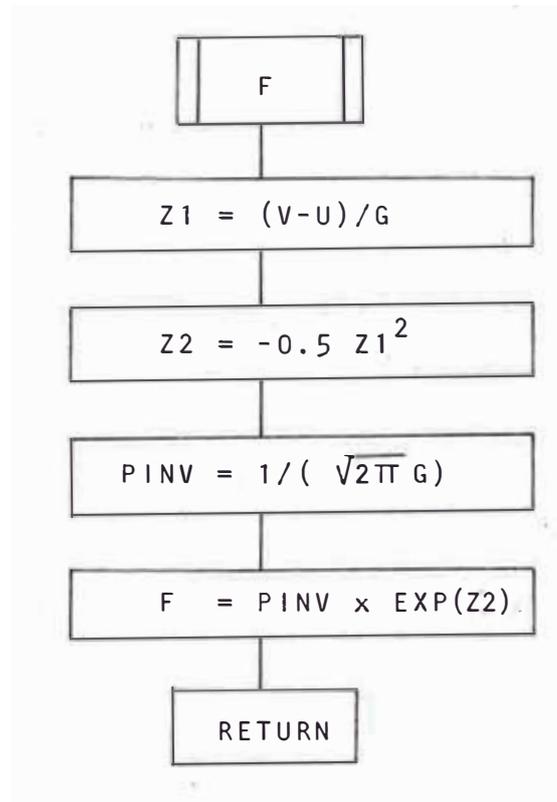


FIG. N°28.- SUBPROGRAMA FUNCTION F QUE OPERA SOBRE LA STRESS DENSITY DISTRIBUTION

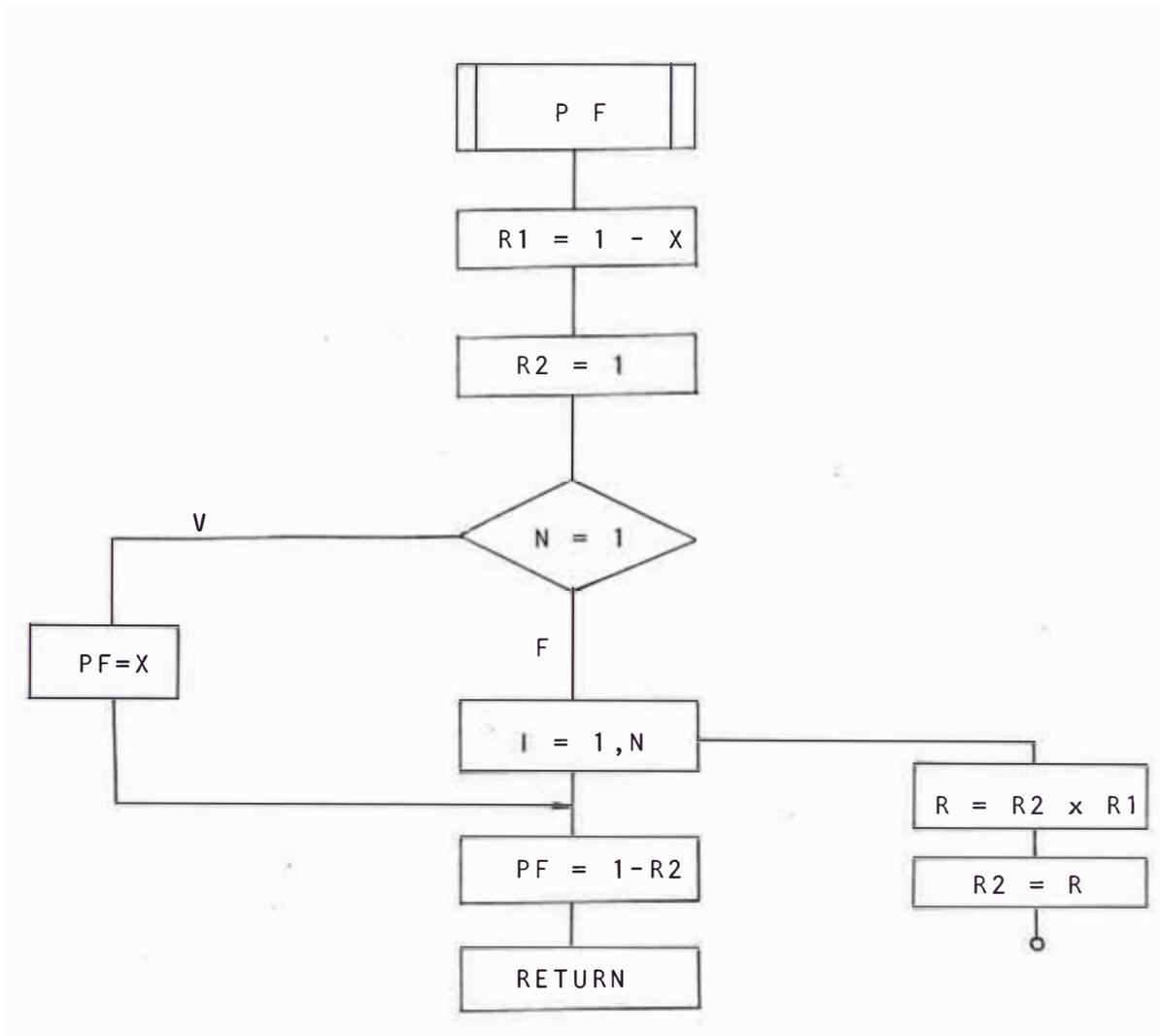


FIG. N° 29.- SUBPROGRAMA FUNCTION PF QUE CALCULA DE DISTRIBUCION DE SOSTENIMIENTOS

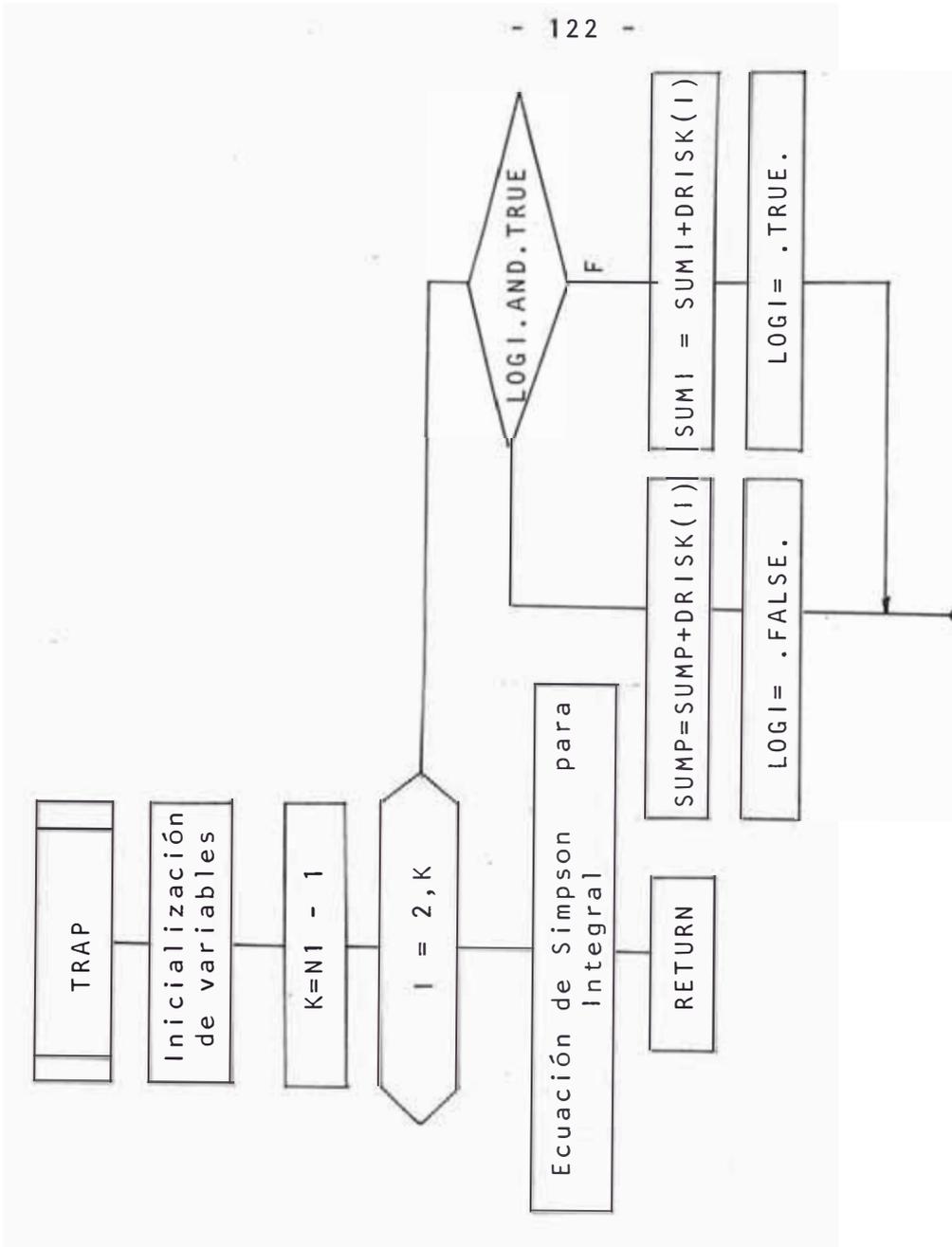


FIG. N° 30.- SUBPROGRAMA FUNCTION QUE APLICA LA REGLA DE SIMPSON PARA INTEGRALES

```
C *****
C *****
C DETERMINATION OF THE RISK OF FAILURE
C *****
C *****

      REAL J
      READ(5,3333)ND
3333  FORMAT(I10)
      WRITE (6,3334)ND
3334  FORMAT(1X,'EL NUMERO DE CASOS ANALIZADOS ES:',I10)
      DO 33 NN=1,ND
      GF=6.0
      READ(5,1000)U,CFO,GS,N
1000  FORMAT(3F10.3,I10)
      WRITE(6,20)NN
      20  FORMAT('0',' ' CASO      ',I4/' ',I8('='))
      WRITE(6,1001)U
1001  FORMAT(1X,'VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:',F8.6)
      WRITE(6,1002)CFO
1002  FORMAT(1X,'TENSION 50%:',F8.6)
      WRITE(6,1003)GS,GF
1003  FORMAT(1X,'GS=',F8.5,'% ',T20,'GF=',F8.6,'%')
      GF=CFO*GF/100.
      GS=U*GS/100.
      WRITE(6,1004)GF,GS
1004  FORMAT(1X,'GF=',F8.6,T20,'GS=',F8.6)
      WRITE(6,1005)N
1005  FORMAT(1X,'NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:',I10)
      CALL RISK(U,CFO,GS,GF,RISKF,N)
      WRITE(6,1006)RISKF
1006  FORMAT(1X,'TOTAL RISK OF FAILURE :',T35,E15.9)
      US=U+2.055*GS
      UW=CFO-1.3*GF
      J=UW/US
      WRITE(6,1007)J
1007  FORMAT(1X,'FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:',F8.6)
      33 CONTINUE
      STOP
      END
C *****
C SUBPROGRAMA QUE EVALUA LA INTEGRAL DEL PRODUCTO DE
C CONVOLUCION.
C *****
      SUBROUTINE RISK(U,CFO,GS,GF,RISKF,N)
      DIMENSION FV(1001),PV(1001),PFB(1001),R(100),DRISK(1001)
      A=CFO-4*GF
      B=U+4*GS
      H=(B-A)/49.
      N1=50
      DO 14 I=1,N1
```

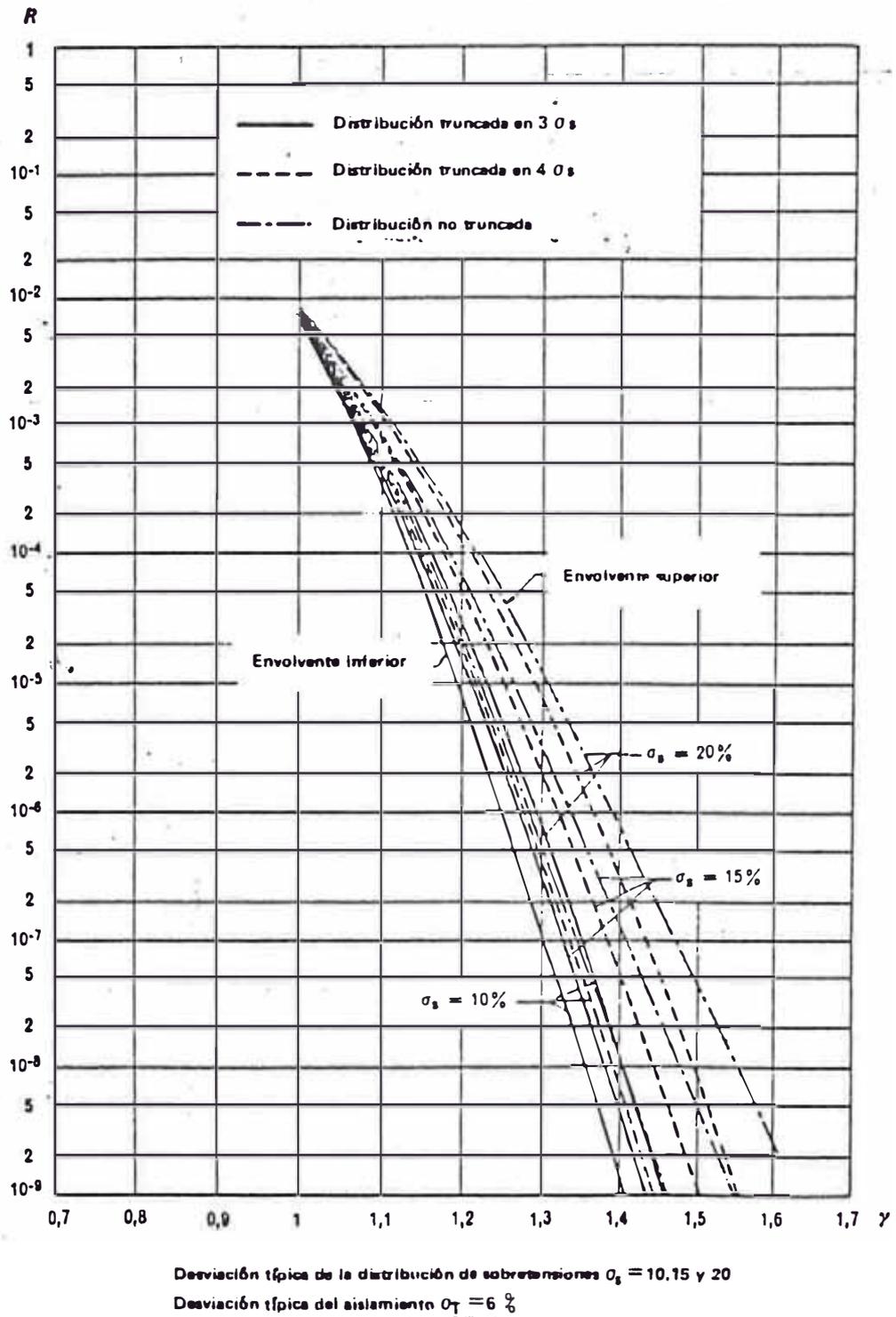
```

      I1=I-1
      A1=A+I1*H
      FV(I)=F(A1,U,GS)
      X=(A1-CFQ)/(1.414*GF)
      PV(I)=(1+ERF(X))/2
      S1=FV(I)
      PFO(I)=PF(S1,N)
      DRISK(I)=FV(I)*PFO(I)
C      WRITE(6,5556)I,A1,FV(I),PFO(I),DRISK(I)
5556      FORMAT(1X,T10,I3,T16,F8.6,T28,E15.8,T40,E15.8,T63,E15.8)
      14  CONTINUE
      RISKF=TRAP(DRISK,N1,H)
      RETURN
      END
C *****
C *****
C SUBPROGRAMA QUE OPERA SOBRE LA STRESS DENSITY DISTRIBUTION
C *****
      FUNCTION F(V,U,G)
      Z1=(V-U)/G
      IF(Z1.LE.0)Z1=-Z1
      Z2=0.5*Z1**2
50  FORMAT(2F10.4)
      PINV=1./(2.507*G)
      F=PINV/EXP(Z2)
      RETURN
      END
C *****
C *****
C SUBPROGRAMA QUE CALCULA LA STRENGTH DISTRIBUTION
C *****
      FUNCTION PF(X,N)
      R1=1-X
      R2=1.
      IF(N.EQ.1)GOTO 71
      DO 7 I=1,N
      R=R2*R1
      R2=R
7   CONTINUE
      PF=1-R2
      GOTO 9
71  PF=X
9   RETURN
      END
C *****
C *****
C SUBPROGRAMA QUE APLICA LA REGLA DE SIMPSON
C *****
      FUNCTION TRAP(DRISK,N1,H)
      REAL DRISK(1001),SUMI,SUMP,H
      LOGICAL LOGI
      DATA LOGI/.TRUE./

```

125

```
...SUMI=0.
...SUMP=0.
...K=N1-1
...DO 6 I=2,K
...   IF (LOGI.AND..TRUE.)GOTO 777
...   SUMI=SUMI+2.*DRISK(I)
...   LOGI=.TRUE.
...   GOTO 6
777   SUMP=SUMP+4.*DRISK(I)
...   LOGI=.FALSE.
6     CONTINUE
...   TRAP=(DRISK(1)+DRISK(N1)+SUMP+SUMI)*H/3
...   RETURN
...   END
```



▲ FIG. N° 30A: Correlación entre el riesgo del fallo (R) y el coeficiente de seguridad estadístico (γ) para diversas distribuciones de sobretensiones tipo maniobra.

5.3 Ejemplos de Aplicación

EL NUMERO DE CASOS ANALIZADOS ES: 31
0 CASO 1

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:	1.920000
TENSION 50%:	2.520000
GS=10.00000%	GF=6.000000%
GF=0.151200	GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:	
TOTAL RISK OF FAILURE :	0.700341910E-02
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:	1.003836

0 CASO 2

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:	1.920000
TENSION 50%:	3.264000
GS=10.00000%	GF=6.000000%
GF=0.195840	GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:	
TOTAL RISK OF FAILURE :	0.255507587E-06
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:	1.300207

0 CASO 3

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:	1.920000
TENSION 50%:	2.520000
GS=10.00000%	GF=6.000000%
GF=0.151200	GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:	5
TOTAL RISK OF FAILURE :	0.261275955E-01
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:	1.003836

0 CASO 4

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:	1.920000
TENSION 50%:	3.264000
GS=10.00000%	GF=6.000000%
GF=0.195840	GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:	5
TOTAL RISK OF FAILURE :	0.127640487E-05
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:	1.300207

0 CASO 5

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:	1.920000
TENSION 50%:	2.520000
GS=10.00000%	GF=6.000000%
GF=0.151200	GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:	20
TOTAL RISK OF FAILURE :	0.637306571E-01
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:	1.003836

0 CASO 6

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:	1.920000
TENSION 50%:	2.520000
GS=10.00000%	GF=6.000000%
GF=0.151200	GS=0.192000

NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 40
 TOTAL RISK OF FAILURE : 0.916102529E-01
 FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.003836
 0 CASO 7

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
 TENSION 50%:2.520000
 GS=10.00000% GF=6.000000%
 GF=0.151200 GS=0.192000
 NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 70
 TOTAL RISK OF FAILURE : 0.118518054E+00
 FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.003836
 0 CASO 8

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
 TENSION 50%:3.264000
 GS=10.00000% GF=6.000000%
 GF=0.195840 GS=0.192000
 NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 20
 TOTAL RISK OF FAILURE : 0.508929952E-05
 FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.300207
 0 CASO 9

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
 TENSION 50%:2.520000
 GS=10.00000% GF=6.000000%
 GF=0.151200 GS=0.192000
 NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 40
 TOTAL RISK OF FAILURE : 0.916102529E-01
 FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.003836
 0 CASO 10

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
 TENSION 50%:2.520000
 GS=10.00000% GF=6.000000%
 GF=0.151200 GS=0.192000
 NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 70
 TOTAL RISK OF FAILURE : 0.118518054E+00
 FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.003836
 0 CASO 11

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
 TENSION 50%:2.520000
 GS=15.00000% GF=6.000000%
 GF=0.151200 GS=0.288000
 NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
 TOTAL RISK OF FAILURE : 0.325025693E-01
 FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:0.924995
 0 CASO 12

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
 TENSION 50%:3.264000

GS=15.000000% GF=6.000000%
GF=0.195840 GS=0.288000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.477469584E-04
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.198089
0 CASO 13

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.264000
GS=20.000000% GF=6.000000%
GF=0.195840 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.878775725E-03
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.110843
0 CASO 14

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.264000
GS=20.000000% GF=6.000000%
GF=0.195840 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 5
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.304191792E-02
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.110843
0 CASO 15

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.264000
GS=20.000000% GF=6.000000%
GF=0.195840 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.878775725E-03
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.110843
0 CASO 16

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.600000
GS=20.000000% GF=6.000000%
GF=0.156000 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.503901243E-01
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:0.884863
0 CASO 17

=====
VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.700000
GS=20.000000% GF=6.000000%
GF=0.162000 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.305922218E-01
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:0.918896
CASO 18
=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.800000
GS=20.00000% GF=6.000000%
GF=0.168000 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.178438686E-01
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:0.952929
CASO 19

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.900000
GS=20.00000% GF=6.000000%
GF=0.174000 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.100082606E-01
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:0.986962
CASO 20

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.000000
GS=20.00000% GF=6.000000%
GF=0.180000 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.540130958E-02
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.020995
CASO 21

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.100000
GS=20.00000% GF=6.000000%
GF=0.186000 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.280516711E-02
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.055029
CASO 22

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.150000
GS=20.00000% GF=6.000000%
GF=0.189000 GS=0.384000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.199219584E-02
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.072045
CASO 23

=====

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.264000
GS=10.00000% GF=6.000000%
GF=0.195840 GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.255507587E-06
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.300207

CASO 24

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.264000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
GF=0.195840 GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.255507587E-06
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.300207
CASO 25

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.600000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
GF=0.156000 GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.295923394E-02
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.035704
CASO 26

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.700000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
GF=0.162000 GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.929048518E-03
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.075539
CASO 27

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.800000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
GF=0.168000 GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.267450698E-03
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.115374
CASO 28

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:2.900000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
GF=0.174000 GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.707874860E-04
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.155208
CASO 29

=====
VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.000000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
GF=0.180000 GS=0.192000
NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:

TOTAL RISK OF FAILURE 0.172241562E-04
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.195043
CASO 30

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.100000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
GF=0.186000 GS=0.192000

NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA:
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.383240695E-05
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.234878
CASO 31

VALOR PROMEDIO DE LAS SOBRETENSIONES:1.920000
TENSION 50%:3.150000
GS=10.000000% GF=6.0000000%
G 0.187000 GS=0.192000

NUMERO DE AISLAMIENTOS EN LA LINEA: 1
TOTAL RISK OF FAILURE : 0.174074648E-05
FACTOR DE SEGURIDAD ESTADISTICO:1.254795

FIG. N°31: CASO 1

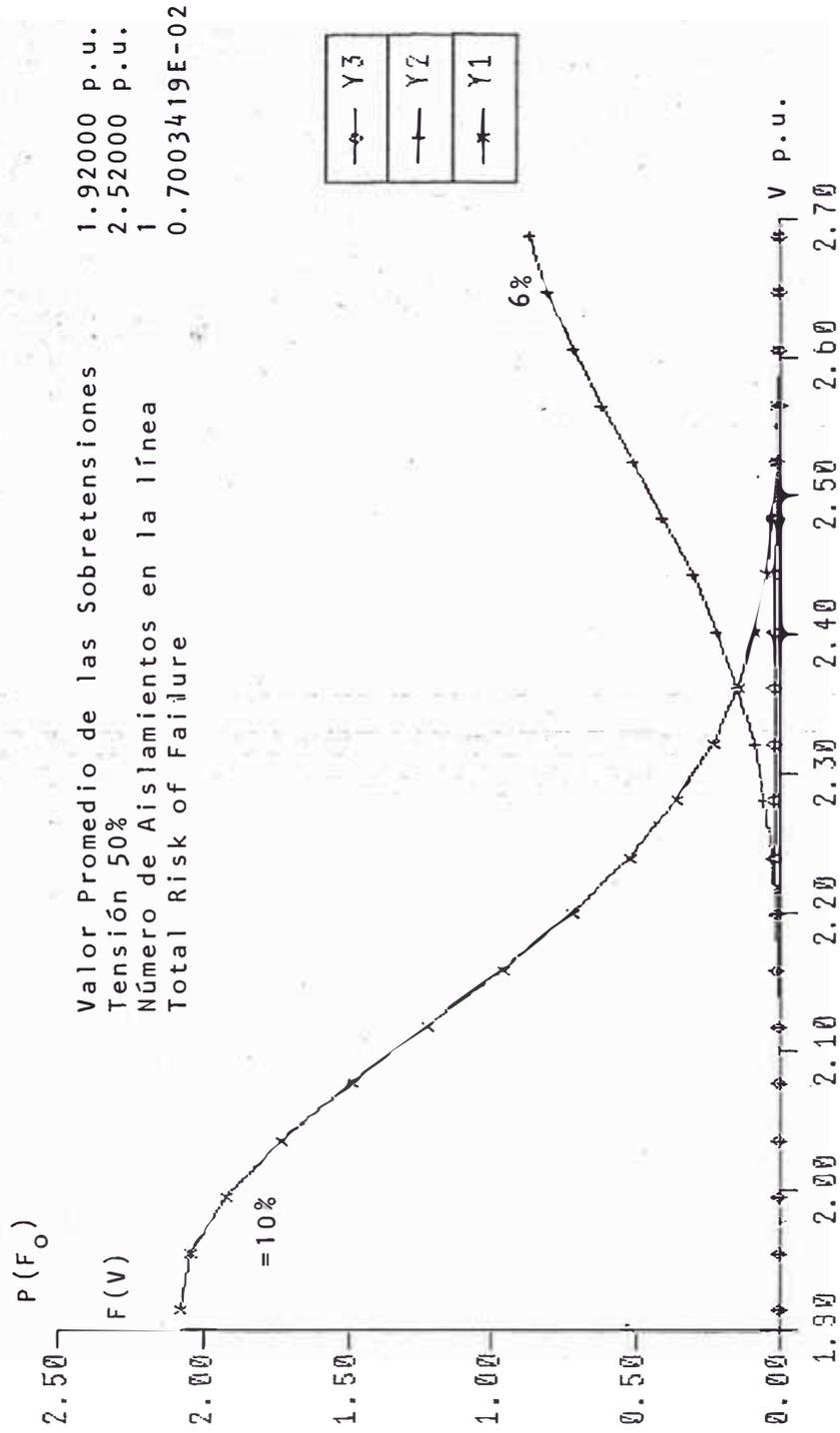
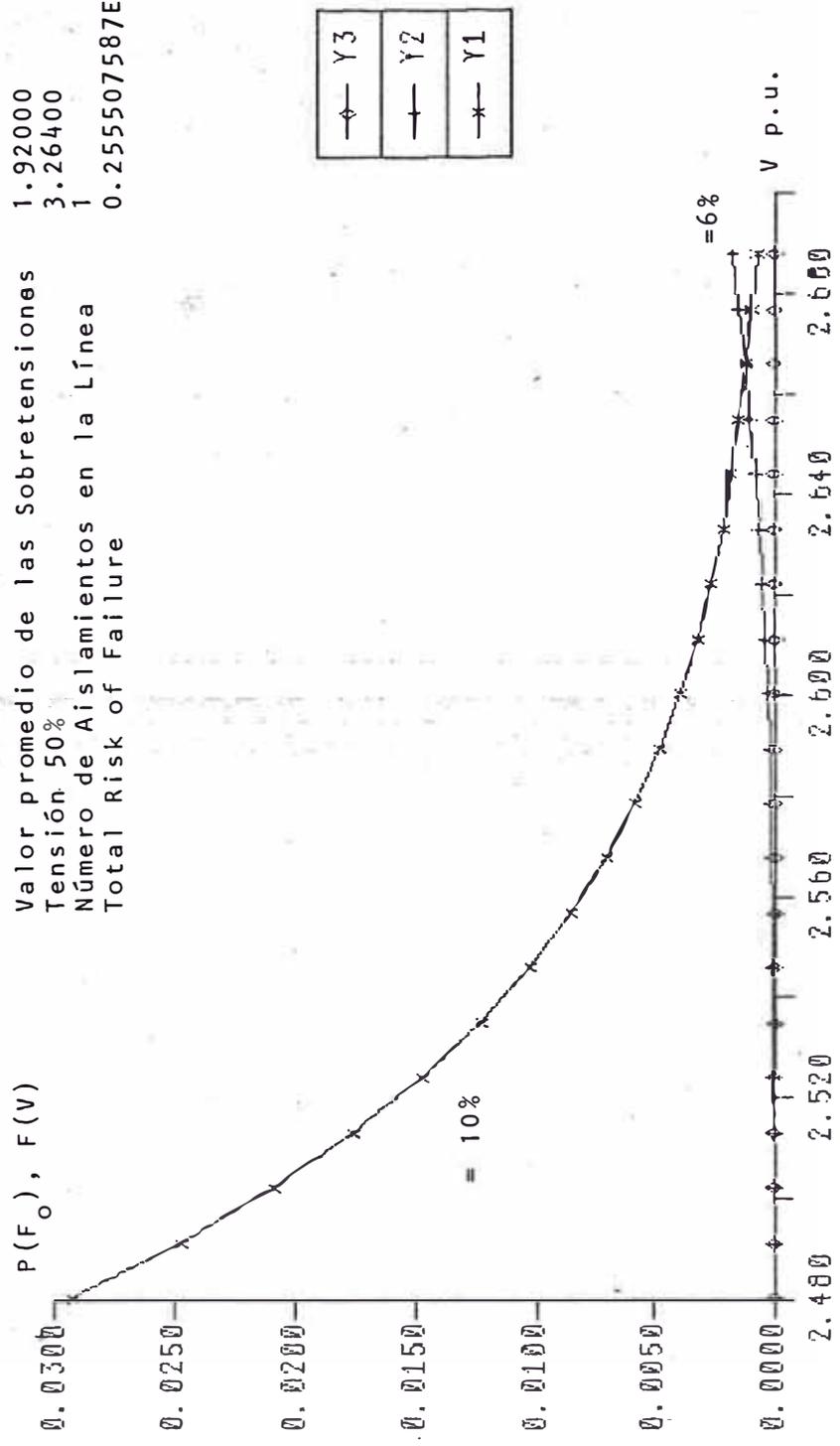


FIG: N°32 : CASO 2

Valor promedio de las Sobretensiones 1.92000
 Tensión 50% 3.26400
 Número de Aislamientos en la Línea 1
 Total Risk of Failure 0.255507587E-06



V p.u.

FIG. N° 33 • CASO 3

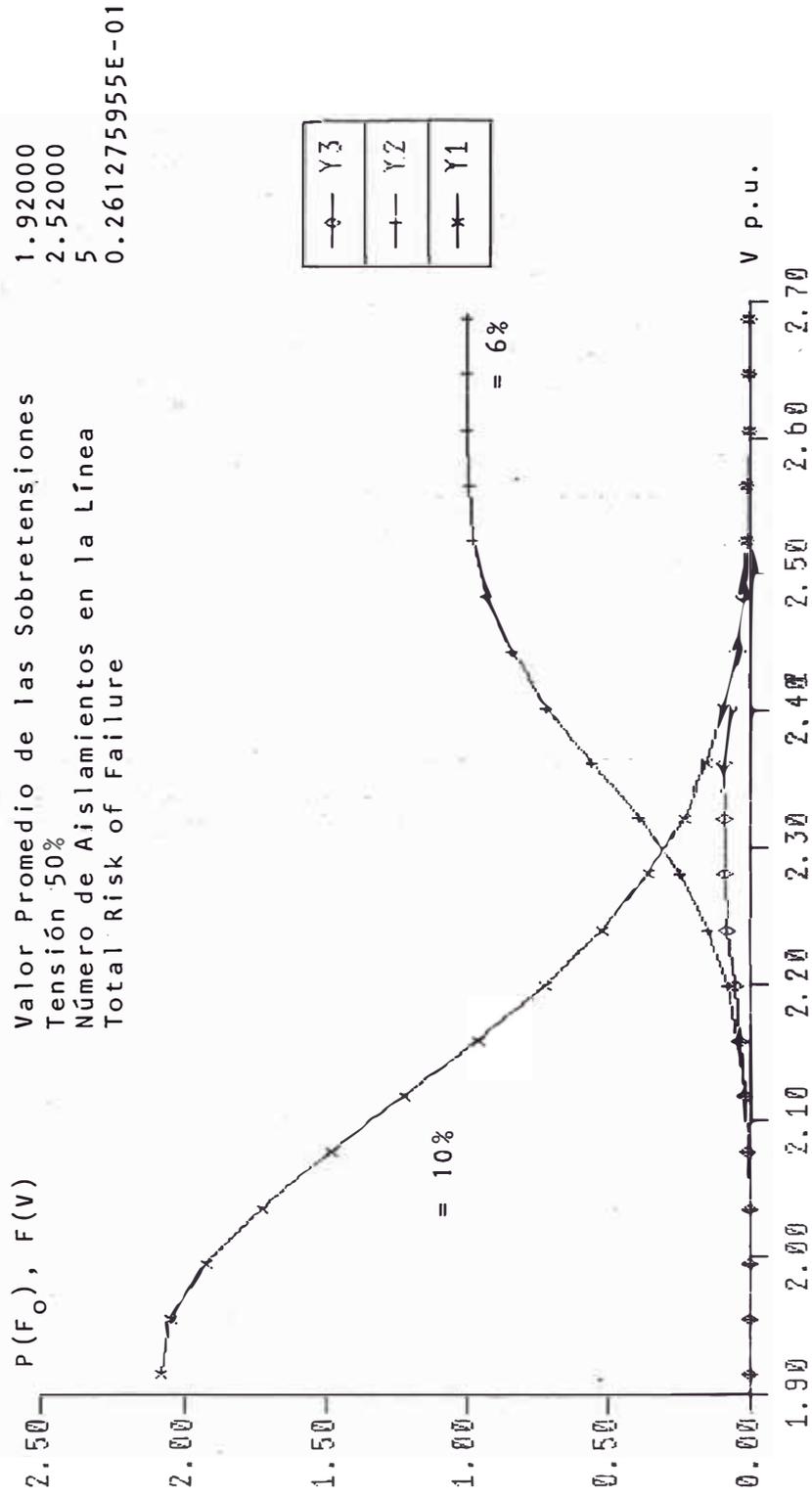


FIG. N°34 : CASO 4

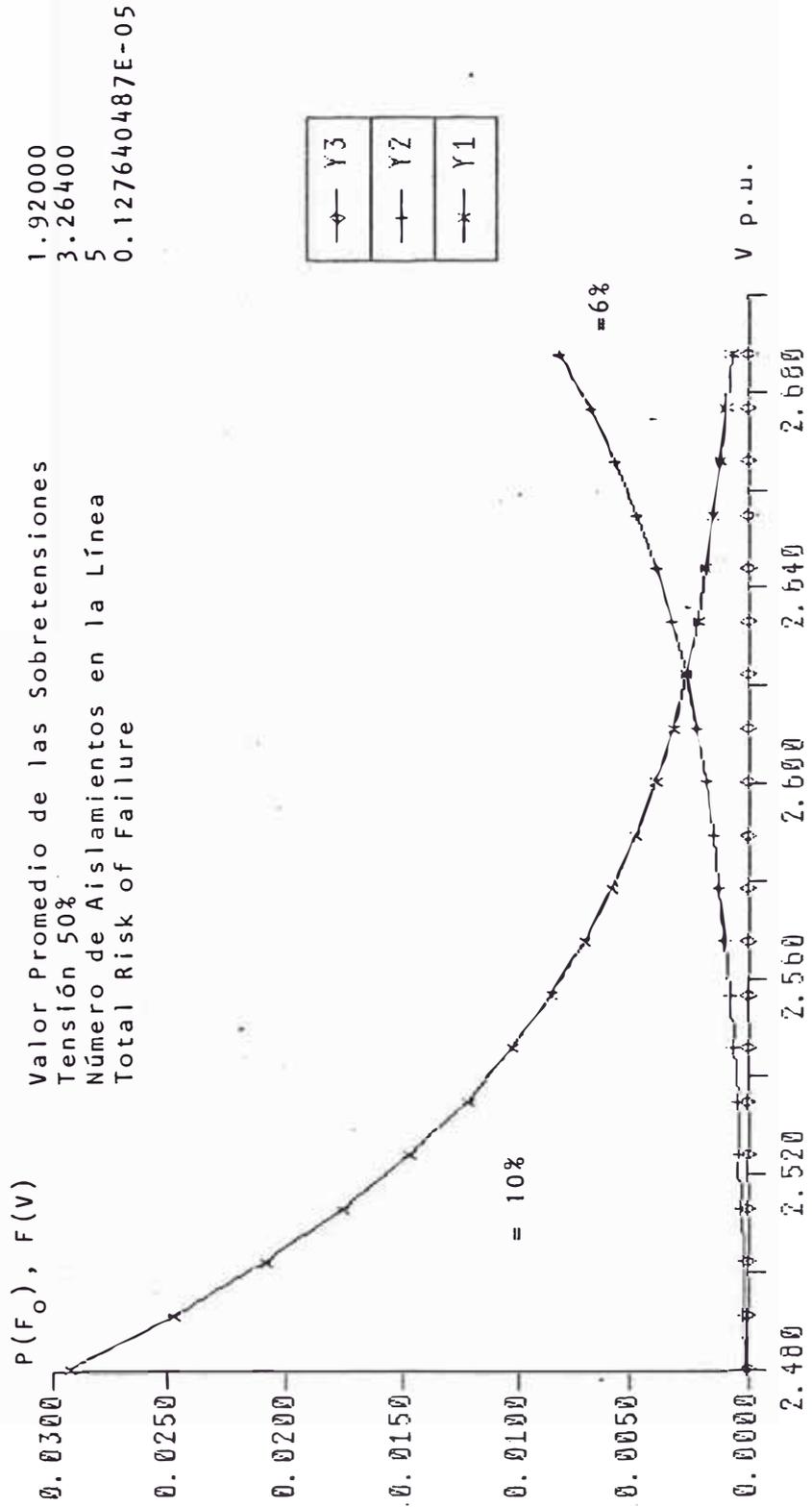
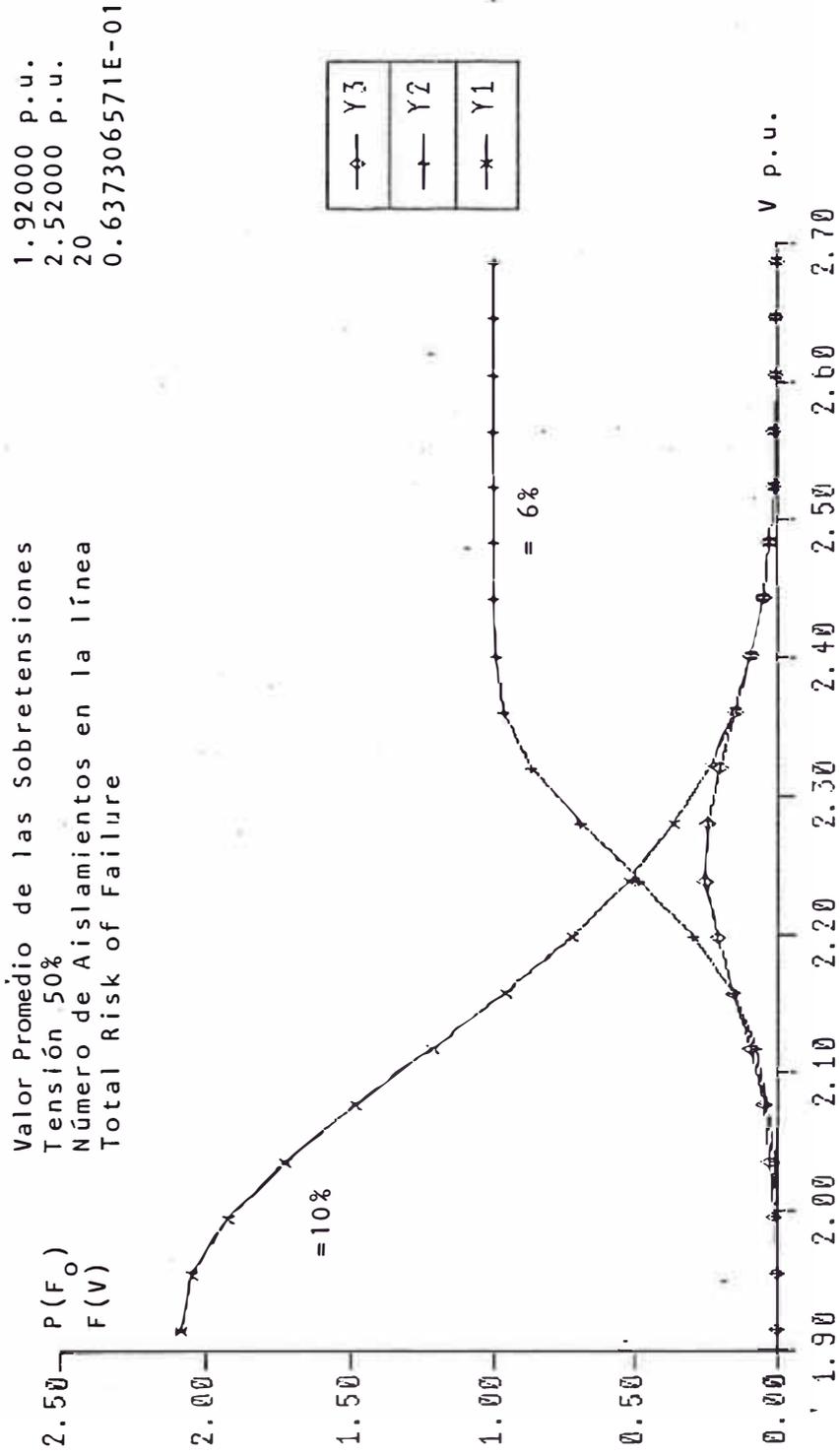


FIG. N°35: CASO 5



L E Y E N D A

Y3 = Producto de Convolución
(Area bajo esta curva es el riesgo de Falla)

Y2 = Probabilidad de Sostenimiento del Aislamiento

Y1 = Densidad de Probabilidad de Sobretensiones