



Universidad Carlos III
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Tecnología electrónica
Grupo de Sistemas Electrónicos de Potencia

ESTUDIO DE LOS EFECTOS FÍSICOS Y SISTEMAS DE PROTECCIÓN EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EMBARCADOS

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Autor: **DAVID LÓPEZ DEL MORAL HERNÁNDEZ**

Tutores: **ANDRÉS BARRADO BAUTISTA
DANIEL IZQUIERDO GIL**

Julio de 2009

Agradecimientos

Me gustaría dedicar este espacio a todas las personas que han hecho posible que yo haya llegado hasta aquí.

En primer lugar debo mencionar a mi familia, especialmente a mi madre Isabel y a mi padre Antonio, que desde muy pequeño me han enseñado que con confianza y dedicación se pueden lograr grandes cosas. Gracias al amor, constancia, ayuda y apoyo de todos ellos he podido llegar hasta aquí y ser la persona que soy.

A mi novia, que me ha acompañado y con la que he tenido la suerte de compartir este importante periodo de mi vida, le agradezco todo el amor, ayuda y apoyo que me ha dado a lo largo de estos años.

A mis compañeros de la universidad y amigos, con los que he compartido tantos buenos y malos momentos, me gustaría agradecerles su ayuda y la gran amistad que hemos compartido, que espero dure muchos años más.

Todos ellos; familia, novia y amigos, han estado siempre a mi lado cuando los he necesitado y su presencia ha sido fundamental, no sólo en la carrera, sino sobre todo en mi vida. Por eso deseo decirles de todo corazón GRACIAS.

Por supuesto no puedo dejar de agradecer a la universidad la oportunidad que me ha brindado de aprender una carrera que me llena y a todos los profesores que me han enseñado, la paciencia y dedicación mostrada.

Especial mención merecen mis dos tutores Andrés Barrado y Daniel Izquierdo, de los que tanto he aprendido, ya que sin su guía y ayuda no habría sido posible realizar este proyecto.

ÍNDICE DE CAPÍTULOS

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES.....	16
2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS.	18
2.1. PROCESO DE IONIZACIÓN Y DESCOMPOSICIÓN	19
2.1.1. Ionización primaria	21
2.1.2. Ionización secundaria	21
2.1.3. Fotoionización	21
2.1.4. Ionización por la interacción de los metaestables	22
2.1.5. Ionización térmica	22
2.1.6. Desionización por recombinación	22
2.1.7. Desionización por adhesión de electrones	23
2.2. DESPRENDIMIENTO DE LOS ELECTRONES DEL CÁTODO.....	23
2.2.1. Emisión fotoeléctrica	23
2.2.2. Emisión de electrones por el impacto de iones positivos y átomos excitados.	24
2.2.3. Emisión térmica.....	24
2.2.4. Emisión por campo	25
2.3. FORMACIÓN DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS	25
2.3.1. Coeficiente de la primera ionización de Townsend	25
2.3.2. Segundo coeficiente de ionización de Townsend y.....	29
2.3.3. Criterio de formación de descarga de Townsend.....	31
2.3.4. Teoría de canales para la descarga eléctrica en gases	32
2.3.4.1. Canal dirigido al cátodo.....	32
2.3.4.2. Canal dirigido al ánodo	33
2.3.5. Criterio de descarga en campos no uniformes.....	35
3. DESCARGAS PARCIALES.....	40
3.1. TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES O CORONAS	41
3.1.1. Descargas parciales positivas o de ánodo.....	41
3.1.2. Descargas parciales negativas o de cátodo.....	45
3.2. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN DIELECTRICOS SÓLIDOS Y GASEOSOS. CASO TÍPICO DE DESCARGA PARCIAL EN LOS HUECOS DEL AISLANTE	47
3.2.1. Disposición gas-sólido	47
3.2.2. Gas entre dos sólidos:	48
3.2.3. Sólido entre dos gases:.....	49
3.2.4. Caso particular de huecos en los aislantes.....	49
3.3. CAMPO DE INICIO DE LA DESCARGA PARCIAL. LEY DE PEEK	50
3.4. EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS DESCARGAS PARCIALES.....	52
3.5. FACTORES INFLUYENTES	53
3.5.1. Temperatura.....	53
3.5.2. Radiaciones	53
3.5.2.1. Radiaciones gamma	53
3.5.2.2. Radiaciones ultravioletas e infrarrojas	53
3.5.2.3. Radiación de las partículas cargadas.....	54
3.5.3. Partículas contaminantes.....	54
3.5.4. Vibraciones mecánicas	54
4. DESCARGAS DISRUPTIVAS	58
4.1. ARCO ELÉCTRICO	58
4.1.1. Arco serie.....	58
4.1.2. Arco paralelo.....	59
4.1.3. Características generales de los arcos	59
4.2. TIPOS DE RUPTURA DEL AISLANTE QUE SEPARA LOS CONDUCTORES	61
4.2.1. Ruptura en aislantes gaseosos.....	61
4.2.1.1. Ruptura en campos uniformes	62
4.2.2. Ruptura en sólidos	63
4.2.2.1. Ruptura intrínseca.....	65
4.2.2.2. Ruptura por avalancha.....	66
4.2.2.3. Ruptura electromecánica	66
4.2.2.4. Ruptura térmica	67
4.2.2.5. Ruptura por erosión	68
4.2.2.6. Electroquímica-tracking.....	72
4.2.3. Ruptura en líquidos.....	72
4.2.3.1. Ruptura electrónica.....	72
4.2.3.2. Mecanismo de partículas sólidas en suspensión.....	73
4.2.3.3. Ruptura en las cavidades.....	74

4.3.	LA TENSIÓN DE RUPTURA. LEY DE PASCHEN.....	75
4.4.	EFFECTOS PRODUCIDOS POR LAS DESCARGAS DISRUPTIVAS	79
4.5.	FACTORES INFLUYENTES.....	79
4.5.1.	<i>Temperatura</i>	79
4.5.2.	<i>Efecto de la frecuencia</i>	80
4.5.3.	<i>Partículas contaminantes</i>	81
4.5.4.	<i>Efecto de la polaridad-Influencia de las partículas cargadas</i>	81
4.5.5.	<i>Vibraciones mecánicas</i>	82
5.	PROTECCIÓN ACTUAL DE SISTEMAS ELÉCTRICOS EMBARCADOS ANTE DESCARGAS ELÉCTRICAS.....	86
5.1.	PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS PARCIALES.....	86
5.1.1.	<i>Recomendaciones frente a descargas parciales con tensiones superiores a 250V_{pico}</i> :	86
5.2.	PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS DISRUPTIVAS.....	87
5.2.1.	<i>Métodos de detección mecánicos</i>	88
5.2.2.	<i>Métodos de detección eléctricos</i>	89
5.2.2.1.	Análisis en el dominio del tiempo	89
5.2.2.2.	Análisis en el dominio de la frecuencia. Transformada de Fourier.....	89
5.2.2.3.	Análisis en el dominio de la frecuencia y el tiempo. Transformada Wavelet	90
5.2.3.	<i>Tecnologías de localización de las faltas</i>	90
5.2.3.1.	Reflectometría.....	90
5.2.3.2.	Inspección visual.....	91
5.2.3.3.	Control de la impedancia.....	91
5.2.3.4.	Sonido	92
5.2.3.5.	Test de alta tensión.....	92
5.2.3.6.	PASD.....	92
5.2.4.	<i>Dispositivos de protección</i>	93
5.2.4.1.	Circuit Breakers	93
5.2.4.1.1.	Circuit Breaker Electrónico (ECB) basado en SiC.....	95
5.2.4.2.	Arc Fault Circuit Breakers (AFCB).....	97
5.2.4.3.	Arc Fault Current Interrupter (AFCI)	98
5.2.4.4.	Remoted Control Circuit Breakers (RCCB).....	99
5.2.4.5.	Solid State Power Controller (SSPC)	100
5.2.4.6.	SSPC con tecnología SiC	103
5.2.4.7.	Soluciones híbridas y complementos a los sistemas de protección	104
5.2.4.7.1.	CB con Surge Arrestor.....	104
5.2.4.7.2.	Smart Panel.....	105
5.2.4.7.3.	SSTDAR ASIC.....	106
5.2.4.7.4.	Método de Control de Interrupción de Falta (CIF).....	109
5.2.4.7.5.	CB electrónico con contactor eléctrico	112
6.	CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS.....	116
6.1.	PAUTAS GENERALES PARA LA PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS ELÉCTRICAS.....	116
6.2.	CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS	118
6.3.	INVESTIGACIONES FUTURAS	119
7.	BIBLIOGRAFÍA	122
8.	ANEXO 1: CAMPOS ELÉCTRICOS.....	130
8.1.	CAMPOS ELÉCTRICOS UNIFORMES	130
8.2.	CAMPOS EN CILINDROS COAXIALES Y ESFERAS CONCÉNTRICAS	131
8.3.	CAMPOS ENTRE ESFERAS	134
8.4.	CAMPO ENTRE CILINDROS PARALELOS.....	136
8.5.	CAMPOS CON MATERIALES ISOTRÓPICOS Y MULTIDIELÉCTRICOS	138
8.5.1.	<i>Configuraciones simples</i>	138
8.6.	DISTRIBUCIONES DE CAMPO TÍPICAS EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICOS	139
9.	ANEXO II: PARTICULARIDADES DE LAS DESCARGAS.....	144
9.1.	EFFECTO PENNING	144
9.2.	DESARROLLO DE PEEK CON DOS CILINDROS COAXIALES.....	144
10.	ANEXO III: SISTEMA ELÉCTRICO DC. ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA CON FALTAS DC.....	148
10.1.	VENTAJAS DE LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DC:.....	148
10.2.	ANÁLISIS ENERGÉTICO ANTE FALTAS DC.....	149

11. ANEXO IV: SISTEMA DE PROTECCIÓN DE RELÉS MEDIANTE LA EXTINCIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO	152
11.1. CURVA DE CARGA LÍMITE.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DE CAMINOS LIBRES EN UN GAS	19
FIGURA 2. PROBABILIDAD DE IONIZACIÓN DEL O ₂ , N ₂ Y H ₂ EN FUNCIÓN DE LA ENERGÍA DEL ELECTRÓN.....	20
FIGURA 3. RELACIÓN ENTRE LA CORRIENTE Y LA TENSIÓN ENTRE DOS CONDUCTORES PLANOS ANTES DE LA DESCARGA	26
FIGURA 4. CREACIÓN DE ELECTRONES LIBRES EN EL PROCESO DE AVALANCHA.	27
FIGURA 5. RELACIÓN ENTRE A/p Y E/p PARA EL H ₂ Y N ₂ A T=0°C.....	29
FIGURA 6. VARIACIÓN DE LA CORRIENTE EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN ENTRE LOS ELECTRODOS, CON CAMPO Y PRESIÓN UNIFORMES	29
FIGURA 7. TEORÍA DE CANALES PARA LA DESCARGA ELÉCTRICA EN GASES. CANAL DIRIGIDO AL CÁTODO.....	32
FIGURA 8. A) FORMACIÓN DE LA CARGA ESPACIAL DEBIDA A LA AVALANCHA DE ELECTRONES. B) DISTORSIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO E_0 DEBIDO AL CAMPO ELÉCTRICO ASOCIADO A LA CARGA ESPACIAL.....	33
FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE CAMPO NO UNIFORME CON DISPOSICIÓN DE PUNTA-PLANO.....	36
FIGURA 10. TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES	40
FIGURA 11. EJEMPLO DE DESCARGA PARCIAL	41
FIGURA 12. ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA FORMACIÓN DE DESCARGAS DE IMPULSO DE ÁNODO Y DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS DE PUNTA-PLANO	42
FIGURA 13. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE UNA DESCARGA DE ÁNODO CON ENTREHIERRO DE 2.5 CM DE AIRE, BAJO DOS NIVELES DE TENSIÓN DIFERENTES	43
FIGURA 14. TRANSICIONES EN LAS DESCARGAS DE ÁNODO.....	44
FIGURA 15. RELACIÓN ENTRE LA FRECUENCIA DE LOS PULSOS DE CORRIENTE TRICHEL Y LA TENSIÓN PARA DIFERENTES LONGITUDES DE ENTREHIERRO DE AIRE CON ELECTRODOS PUNTA-PLANO DE POLARIDAD NEGATIVA.....	45
FIGURA 16. DESCARGA DE CÁTODO CON ELECTRODOS DE PUNTA-PLANO.....	46
FIGURA 17. DIELECTRICO GASEOSO JUNTO A DIELECTRICO SÓLIDO.....	47
FIGURA 18. DIELECTRICO GASEOSO EN MEDIO DE DOS DIELECTRICOS SÓLIDOS	48
FIGURA 19. DIELECTRICO SÓLIDO EN MEDIO DE DOS GASEOSOS	49
FIGURA 20. INTENSIDAD DE CAMPO DE RUPTURA EN EL HUECO DE UN AISLANTE SÓLIDO	50
FIGURA 21. TENSIÓN DE INICIO DE DESCARGA PARCIAL EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD DEL ENTREHIERRO, PARA DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS PUNTA-PLANO CON RADIO DE PUNTA FIJO	51
FIGURA 22. ESQUEMA DE CIRCUITO CON ARCO SERIE.....	58
FIGURA 23. ESQUEMA DE CIRCUITO CON ARCO PARALELO	59
FIGURA 24. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE TENSIÓN-CORRIENTE DE ARCO ELÉCTRICO.....	60
FIGURA 25. CURVA CARACTERÍSTICA CRÍTICA DE ARCO ELÉCTRICO PARA UN CIRCUITO DADO	60
FIGURA 26. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO Y EL PRODUCTO $p \cdot d$	62
FIGURA 27. EFECTO DE ALGUNOS FACTORES SOBRE LA RESISTENCIA DIELECTRICA DEL TEFLÓN	64
FIGURA 28. MECANISMOS DE RUPTURA EN SÓLIDOS	65
FIGURA 29. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD EN FUNCIÓN DEL CAMPO APLICADO	67
FIGURA 30. ESQUEMA ELÉCTRICO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN UN AISLANTE SÓLIDO CON UN HUECO EN SU INTERIOR	69
FIGURA 31. SECUENCIA DE DESCARGAS EN EL HUECO DEL AISLANTE BAJO TENSIONES ALTERNAS	70
FIGURA 32. ESQUEMA DEL DESARROLLO DE TIPO ÁRBOL DE UNA DESCARGA A TRAVÉS DE UN AISLANTE SÓLIDO	71
FIGURA 33. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUPTURA Y EL TIEMPO DE USO EN CABLES DE POLIETILENO CON DIFERENTES FABRICANTES	71
FIGURA 34. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO A RUPTURA Y EL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN DEL LÍQUIDO	74
FIGURA 35. CURVA DE PASCHEN	75
FIGURA 36. RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE IONIZACIÓN (\bar{A}/p) Y EL CAMPO ELÉCTRICO APLICADO (E/p).....	77
FIGURA 37. CURVA DE PASCHEN PARA EL AIRE (CÍRCULOS NEGROS) A TEMPERATURA DE 20°C CALCULADA MEDIANTE $Vb = 6.72 \cdot p \cdot d + 24.4 \cdot (p \cdot d)$	78
FIGURA 38. FRECUENCIAS CRÍTICAS A DIFERENTES PRESIONES.....	80
FIGURA 39. (A) DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN MONTAJE DE PUNTA-PLANO POSITIVO; (B) DISTRIBUCIÓN DE CAMPO POR EL EFECTO DE LAS PARTÍCULAS CARGADAS	81
FIGURA 40. (A) DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN MONTAJE DE PUNTA-PLANO NEGATIVO; (B) DISTRIBUCIÓN DE CAMPO POR EL EFECTO DE LAS PARTÍCULAS CARGADAS	82
FIGURA 41. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN DE LAS FALTAS POR ARCO	88

FIGURA 42. ESQUEMA DE SISTEMA DE DETECCIÓN DE ARCOS	89
FIGURA 43. LOCALIZACIÓN DEL ARCO MEDIANTE PASD	93
FIGURA 44. CURVAS CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE UN CIRCUIT BREAKER	94
FIGURA 45. PANEL DE CIRCUIT BREAKER.....	95
FIGURA 46. ESQUEMA DEL CB SEMICONDUCTOR CON BASE DE SIC	96
FIGURA 47. DISPOSITIVO DE MEDIDA DEL CB SEMICONDUCTOR.....	96
FIGURA 48. AFCB.....	97
FIGURA 49. RCCB FABRICADO POR E-T-A	99
FIGURA 50. DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE UN RCCB FABRICADO POR E-T-A.....	100
FIGURA 51. SSPC DEL FABRICANTE DDC	101
FIGURA 52. MÓDULO DE 10 SSPC CONECTADO AL BUS DE DISTRIBUCIÓN	101
FIGURA 53. ESQUEMA DE DISPOSICIÓN DE LOS SSPC EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DEL AVIÓN.....	102
FIGURA 54. ARQUITECTURA INTERNA DE UN SSPC	103
FIGURA 55. CURVAS V/I DE UN SURGE ARRESTOR.....	104
FIGURA 56. POSIBLE CONFIGURACIÓN DEL SMART PANEL (1)	106
FIGURA 57. POSIBLE CONFIGURACIÓN DEL SMART PANEL (2)	106
FIGURA 58. RESPUESTA DEL STDR ANTE FALTA EN EL CABLE A 80 PIES.....	108
FIGURA 59. PROTOTIPO WILMA S/SSTDR.....	108
FIGURA 60. COMPARACIÓN DEL TAMAÑO DEL ASIC.....	109
FIGURA 61. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE UN CIF.....	111
FIGURA 62. LÍNEAS DE CAMPO PARA DOS ELECTRODOS CON LA DISPOSICIÓN DE ROGOWSKI	131
FIGURA 63. (A) CILINDROS COAXIALES Y (B) ESFERAS CONCÉNTRICAS	132
FIGURA 64. TENSIÓN DE RUPTURA (V_B) Y DE INICIO DE DESCARGA (V_I) PARA CILINDROS COAXIALES CON AISLANTE DE SF6 EN FUNCIÓN DE R_1/R_2 A 20°C	133
FIGURA 65. MONTAJE TIPO ESFERA-ESFERA.....	134
FIGURA 66. DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO A LO LARGO DEL EJE $M-M'$ CON DISPOSICIÓN ESFERA-ESFERA PARA VARIOS VALORES DE S/R	136
FIGURA 67. DISPOSICIÓN DE DOS LÍNEAS CARGADAS EN PARALELO	136
FIGURA 68. DOS CONDUCTORES ELÉCTRICOS IGUALES EN PARALELO, SIMÉTRICAMENTE CARGADOS.....	137
FIGURA 69. DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO ENTRE DOS CONDUCTORES CILÍNDRICOS DEL MISMO RADIO R , PARA DIFERENTES RATIOS S/R , SIENDO S LA LONGITUD DEL ENTREHIERRO	137
FIGURA 70. DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS PLANOS PARALELOS CON DOS CAPAS DIFERENTES DE AISLANTE	138
FIGURA 71. CAMPO ELÉCTRICO ENTRE DOS CONDUCTORES LINEALES CON DIFERENTE POLARIDAD	140
FIGURA 72. CAMPO ELÉCTRICO ENTRE DOS CONDUCTORES LINEALES CON LA MISMA POLARIDAD.....	140
FIGURA 73. CAMPO ELÉCTRICO ENTRE CUATRO CONDUCTORES LINEALES CON DISTINTA POLARIDAD.....	141
FIGURA 74. DISTRIBUCIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO ENTRE UN CONDUCTOR Y EL PLANO DE TIERRA	141
FIGURA 75. DISTRIBUCIÓN DE CAMPO ELÉCTRICO ENTRE UN CONDUCTOR Y EL PLANO DE TIERRA	142
FIGURA 76. LÍNEAS DE CAMPO ELÉCTRICO DESDE UN CONDUCTOR CILÍNDRICO AL PLANO DE TIERRA	142
FIGURA 77. CURVAS DE TENSIÓN DE RUPTURA PARA LA MEZCLA DE NEÓN-ARGÓN CON ELECTRODOS DE PLANOS PARALELOS, ENTREHIERRO DE 2 CM Y $T=0^\circ\text{C}$	144
FIGURA 78. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CAMPO AL INICIO DE CORONA (E_c/d) PARA CILINDROS COAXIALES EN AIRE .	146
FIGURA 79. FLUJO DE CORRIENTE ANTE FALTA DC	150
FIGURA 80. CIRUCITO ESQUEMÁTICO DE ARCO ELÉCTRICO ENTRE CONTACTORES	152
FIGURA 81. CONFIGURACIÓN DE CONTACTOS EN PUENTE PARA LA EXTINCIÓN DEL ARCO.....	153
FIGURA 82. CURVAS DE CARGA LÍMITE.....	153
FIGURA 83. TENSIÓN Y CORRIENTE DE ARCO PARA 14V _{DC} , 30A, CARGA RESISTIVA, TIPO DE RELÉ K-D CON CONTACTOR SIMPLE Y LONGITUD DE GAP 0.25MM.....	154
FIGURA 84. TENSIÓN Y CORRIENTE DE ARCO PARA 42V _{DC} , 10A, CARGA RESISTIVA, TIPO DE RELÉ K-D CON CONTACTOR SIMPLE Y LONGITUD DE GAP 0.25MM.....	154
FIGURA 85. TENSIÓN Y CORRIENTE DE ARCO PARA 14V _{DC} , 30A, CARGA RESISTIVA, TIPO DE RELÉ K-B CON CONTACTOR EN PUENTE Y LONGITUD DE GAP 2*0.25MM	155

ÍNDICE DE TABLAS

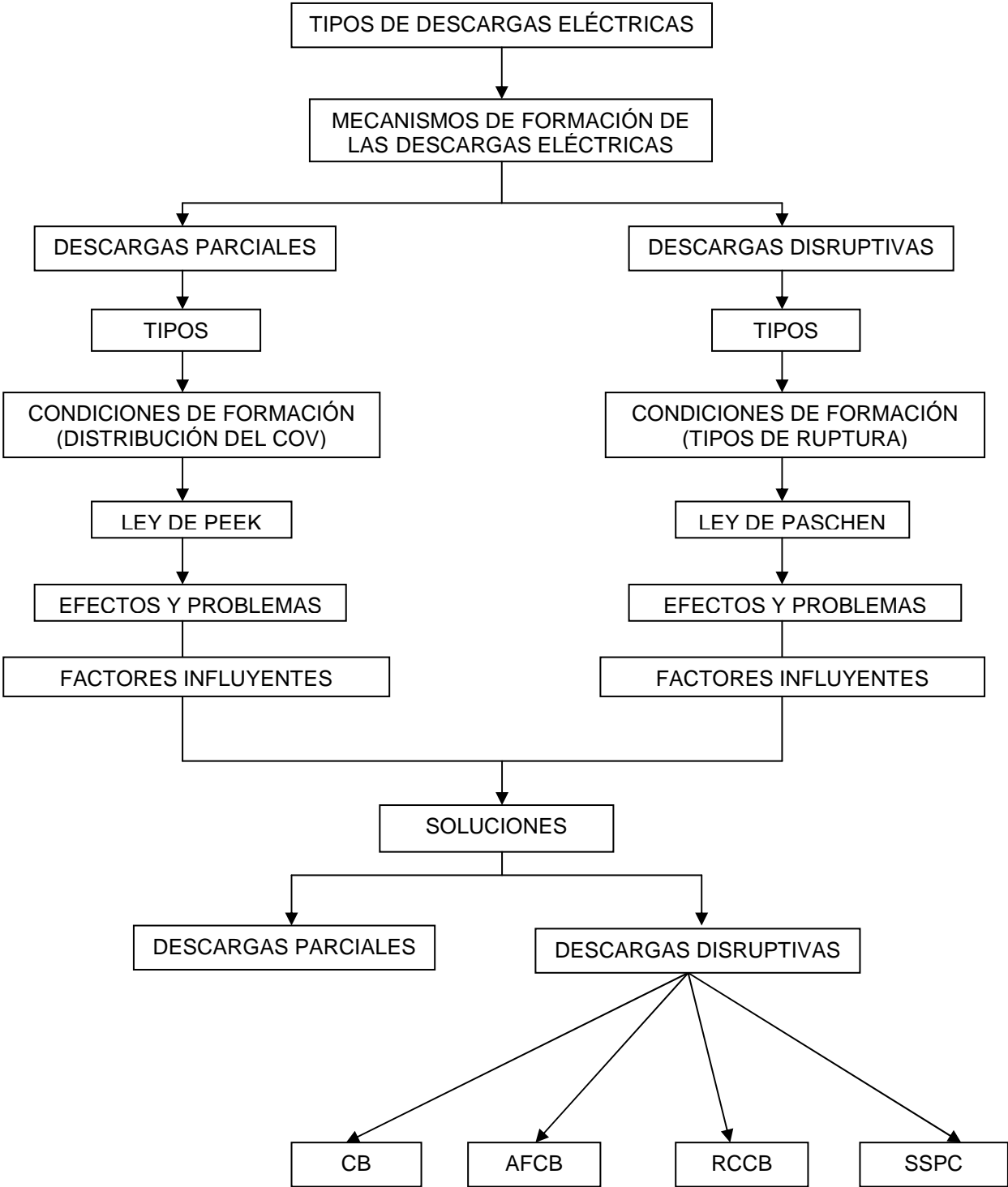
TABLA 1. FUNCIÓN DE TRABAJO PARA ELEMENTOS TÍPICOS	23
TABLA 2. CONSTANTES DE IONIZACIÓN A Y B PARA T=20°C	28
TABLA 3. INFLUENCIA DE LA SUPERFICIE DEL CÁTODO EN EL VALOR DE Γ	31
TABLA 4. TENSIONES DE RUPTURA TÉRMICA A 20°C	68
TABLA 5. TENSIONES DE RUPTURA MÍNIMAS PARA VARIOS GASES	79

LISTA DE ACRÓNIMOS

AC	Alternate Current
AEA	All Electric Aircraft
AFCB	Arc Fault Circuit Breaker
AFCI	Arc Fault Circuit Interrupter
ATSRAC	Aging Transport Systems Rulemaking Advisory Comite
CB	Circuit Breaker
CIF	Control de Interrupción de Falta
COV	Corona Onset Voltage
DC	Direct Current
ECB	Electronic Circuit Breaker
EMI	Electromagnetic Interference
ESDP	Electronic Power Distribution System
FAA	Federal Aviation Administration
FDR	Frecuency Domain Reflectometry
FMCW	Frecuency Modulated Continuous Wave
HV	High Voltage
HVDC	High Voltage Direct Current
MCR	Multi Carrier Reflectometry
MEA	More Electric Aircraft
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio
NDR	Noise Domain Reflectometry
PASD	Pulse Arrested Spark Discharge
PDC	Power Distribution Center
PDR	Phase Detection Reflectometry

RCCB	Remoted Control Circuit Breaker
SA	Surge Arrestor
SDP	Sistema de Distribución de Potencia
SSPC	Solid State Circuit Breaker
SSTDR	Spread Spectrum Time Domain Reflectometry
STDR	Secuence Time Domain Reflectometry
SWDS	Smartwire Diagnostic System
SWR	Standing Wave Reflectometry
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TDR	Time Domain Reflectometry
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
WILMA	Wire In Line Maintenance Aim

ORGANIGRAMA DE LA ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO



CAPÍTULO I:
INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

1. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es el estudio del estado de la técnica referente al campo de las descargas eléctricas en sistemas embarcados.

En este trabajo se identifican los problemas y las soluciones que se han descubierto hasta la fecha, relacionados con el campo de las descargas eléctricas, además se sintetizan y clarifican las leyes físicas que rigen este tipo de fenómenos. De esta forma se busca reunir en un único documento la información más importante y puntera sobre este tema.

Se profundizará en el fenómeno de la formación y efectos de las descargas eléctricas, así como en las protecciones que se ofrecen actualmente en el mercado para este tipo de efectos. El estudio se centrará especialmente en el entorno de los sistemas embarcados aeronáuticos.

Las motivaciones a la hora de realizar este trabajo se fundamentan en la dificultad de conseguir información y sintetizar los diferentes estudios que se están realizando al respecto. Las nuevas investigaciones se centran en el cambio de estructura que están sufriendo los aviones en estos momentos, en lo referente a sus sistemas de distribución de potencia (SDP). En el futuro los aviones van a ser más eléctricos. Se van a sustituir los actuadores neumáticos, hidráulicos y mecánicos por otros eléctricos. Gracias a la introducción de la tecnología que hará esto posible, basada en nuevos sistemas de distribución de potencia, se conseguirá una mayor fiabilidad, menor coste de mantenimiento y mayor capacidad de auto diagnóstico (por la eliminación de los componentes necesarios en los otros actuadores, como tuberías, válvulas, bombas...).

Con la implantación de los nuevos SDP en los aviones más eléctricos (o "More Electric Aircraft" MEA) y en los totalmente eléctricos (o "All Electric Aircraft" AEA), hay más sistemas que dependen de la electrónica de potencia. Estos nuevos SDP son la respuesta ante problemas como el gran peso, volumen y pérdidas por disipación de calor ocasionadas por el cableado. Gracias a los nuevos niveles de tensión empleados en los nuevos SDP, que pasarán de $28V_{DC}$ y $115V_{AC}$ a $270V_{DC}$ en aplicaciones militares y $230V_{AC}$ en aplicaciones civiles, se consigue disminuir la corriente que circula por los cables manteniendo los niveles de potencia. Gracias a esta reducción de la corriente es posible emplear galgas de menor diámetro en los cables. De esta forma se disminuye el peso y el volumen ocupado por el cableado en el avión.

Los sistemas de protección son una parte fundamental de los SDP y deben encargarse de proteger tanto a los cables como a otros tipos de equipos eléctricos, así como proporcionar un entorno seguro para las personas.

CAPÍTULO II:

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS

2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS.

Antes de explicar el mecanismo de formación de las descargas eléctricas y las leyes que rigen su comportamiento es preciso definir el concepto de camino libre de las partículas en gases.

El camino libre (λ) es la distancia media que recorre una partícula antes de colisionar con otra. Debido al carácter aleatorio de las colisiones, λ se calcula de forma estadística en función de la densidad de los elementos que se desplazan por el gas y que colisionan con las partículas del mismo.

La expresión de los caminos libres obtenida tras una serie de análisis y desarrollos estadísticos se muestra en la *Ecuación (1)* [Kuffel00] como la media de los caminos libres. La variable $\bar{\lambda}$ tiene unidades de longitud [cm].

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N \cdot \pi \cdot (r_1 + r_2)^2} = \frac{1}{N \cdot \sigma} \quad (1)$$

Donde N representa la densidad del gas [número de moléculas/unidad de volumen] y $\sigma = \pi \cdot (r_1 + r_2)^2$ es el área de colisión de cada partícula [cm²], es decir, representa la distancia máxima alrededor de la partícula en movimiento a la que puede estar otra partícula sin colisionar con ella.

De esta ecuación se deduce que cuanto mayor es la densidad de las partículas que se desplazan dentro de un gas, menor es la distancia que recorrerán a través del mismo. Lo mismo sucede cuando el área de colisión es muy grande, esto es, cuando los radios de las partículas que colisionan son grandes.

En este estudio el caso principal de análisis es el que se centra en el movimiento de los electrones dentro de un gas, cuyas colisiones pueden dar lugar a la ionización del gas, como veremos más adelante. Para este caso, la media de los caminos libres en un gas con átomos de radio r es:

$$\bar{\lambda}_e = 5.66 \cdot \frac{1}{4 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot N} \quad (2)$$

En la Figura 1 [Kuffel00] se puede ver representada la evolución del número de partículas en función de la distancia recorrida x a través de un gas.

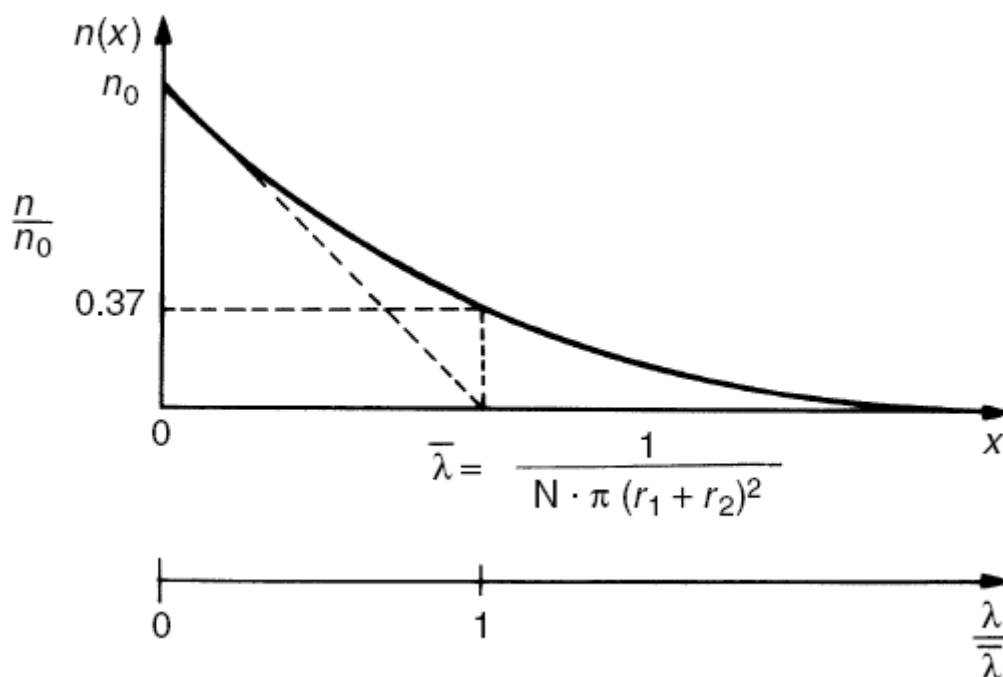


Figura 1. Distribución de caminos libres en un gas

En esta figura se aprecia claramente que del número total de partículas que comienzan el camino en $x=0$ (n_0) sólo un número muy reducido o prácticamente nulo llega a recorrer la distancia completa. La continua reducción del número de partículas en función de la distancia que recorren es debida a las colisiones que se producen en el seno del gas, que van frenando el avance de las partículas. La ecuación a la que responde la Figura 1, así como su desarrollo, se puede encontrar en la bibliografía [Kuffel00].

2.1. PROCESO DE IONIZACIÓN Y DESCOMPOSICIÓN

El proceso de ionización de las moléculas de un gas es la causa principal de la pérdida de aislamiento en el mismo. La ionización suele darse en el momento de las colisiones de los electrones cuando se desplazan a través del gas. En función del tipo de colisión y de las características de los elementos que intervienen en ellas se desprenderá una cantidad y tipo de energía, que en algunos casos puede dar lugar a la ionización de las partículas que colisionan, para más detalle al respecto ver [Kuffel00] y [Ortega96]. En la colisión de partículas la energía ocasionada por el choque suele cederse a un electrón. Cuando esta energía es superior a la de enlace del electrón éste se escapa y se convierte en una partícula libre, con lo que el átomo queda cargado positivamente.

En presencia de un campo eléctrico grande, las partículas cargadas pueden ganar suficiente energía para ionizar a las partículas neutras al impactar con ellas.

La efectividad o capacidad de ionización por choque que presenta un electrón depende de la energía que es capaz de ganar al recorrer los caminos libres en

la dirección del campo eléctrico aplicado, que le ejerce la fuerza para que se mueva a través del gas.

La energía que gana un electrón recorriendo el camino libre principal ($\bar{\lambda}_e$) dentro de un campo eléctrico E se puede calcular con la expresión:

$$\Delta W = e \cdot E \cdot \bar{\lambda}_e \quad (3)$$

Donde ΔW es proporcional a E/p ya que $\bar{\lambda}_e$ es inversamente proporcional a la densidad de los electrones en el gas y por lo tanto es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional a la presión (p).

Para que la energía de la colisión provoque la ionización, ΔW debe ser mayor que la energía de ionización de la molécula ($e \cdot V_i$). Un electrón con una energía inferior a la de ionización puede excitar otras moléculas que al chocar a su vez con otros electrones les otorgan la energía necesaria para poder provocar la ionización. Esta condición ($\Delta W \geq e \cdot V_i$), aunque es necesaria no es suficiente, ya que sólo responde al modelo más simple de ionización. Como en otros aspectos relacionados con las descargas eléctricas este proceso se estudia con un análisis de probabilidad y se suele expresar en función del área de ionización por colisión (σ_i) [Kuffel00]. Siendo P_i la probabilidad de ionización por la colisión y σ el área de colisión:

$$P_i \cdot \sigma = \sigma_i \quad (4)$$

En la Figura 2 [Kuffel00] se representa la relación entre la probabilidad de que una molécula de gas se ionice por medio de una colisión (σ_i), en función de la energía del electrón que choca con ella, para los gases O_2 , N_2 y H_2 .

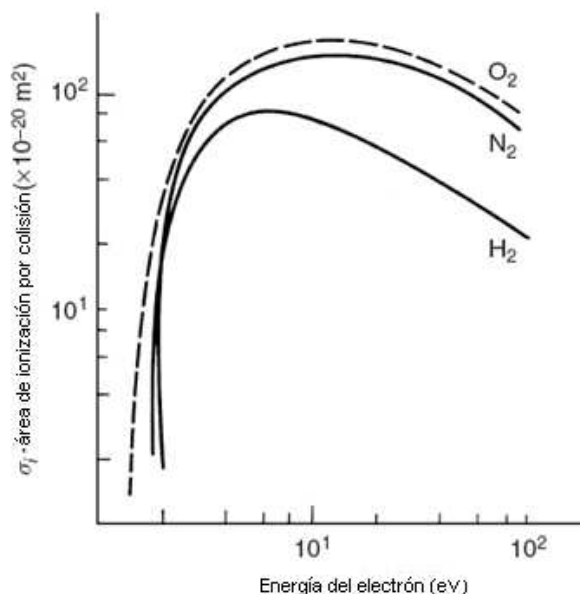


Figura 2. Probabilidad de ionización del O_2 , N_2 y H_2 en función de la energía del electrón

En la figura anterior se puede ver que para cada gas hay un nivel de energía del electrón con el que se consigue una probabilidad máxima de ionización. Esto significa que no es suficiente con que la energía del electrón sea superior a la de ionización de la partícula. Además, se deduce que una energía del electrón mayor no indica que la probabilidad de ionización lo sea también, sino que hay una energía “óptima” que aumenta la probabilidad de que se ionice la molécula implicada en el choque. Este valor óptimo es diferente para cada gas.

Algunos de los procesos a través de los cuales se produce la ionización y la desionización se explican a continuación:

2.1.1. Ionización primaria

Es la que se produce por la transferencia de energía desde la partícula cargada incidente a los electrones atómicos en un choque. Si la energía no es suficiente para desprender el electrón podrá darse de todas formas una excitación del átomo en la cual el electrón ocupa un nivel superior de energía (para más información al respecto ver [Ortega96]).

2.1.2. Ionización secundaria

La ionización secundaria es la producida por los electrones libres generados en la ionización primaria, que a veces tienen la energía suficiente para producir nuevas ionizaciones en los átomos del material que atraviesan y liberando nuevos electrones atómicos.

2.1.3. Fotoionización

Al colisionar un electrón con un átomo puede no dar la suficiente energía como para ionizar dicho átomo, pero sí puede provocar un cambio en el nivel de energía (excitación). Este estado de excitación puede ser temporal, dando lugar a la emisión de un fotón al volver el electrón excitado a su nivel de energía inicial. La energía despreñida (fotón) puede ionizar a otro átomo con energía de ionización inferior. A este proceso se le conoce como fotoionización. El hecho de que la energía del fotón sea muy superior a la de ionización no implica mayor probabilidad de ionización, ya que la máxima probabilidad de fotoionización se da cuando esta diferencia es pequeña (0.1-1 eV).

La fotoionización es un proceso de ionización secundario que puede actuar en el proceso de ruptura de Townsend y es esencial en muchos mecanismos de descargas eléctricas.

Para mayor detalle consultar [Kuffel00].

2.1.4. Ionización por la interacción de los metaestables

En ciertos elementos el tiempo de vida en un estado excitado puede alcanzar algunos segundos. Los átomos que presentan esta característica son conocidos como metaestables y se representan por A^m . Los metaestables suelen tener una energía potencial elevada, por lo que son capaces de ionizar a átomos neutros. En función de la relación entre las energías de los átomos que entran en contacto en el choque y de los tipos de átomos, se pueden dar diferentes tipos de reacciones que pueden concluir en la ionización o excitación de los elementos que intervienen en el choque.

Para más información al respecto ver [Kuffel00].

2.1.5. Ionización térmica

Este proceso se fundamenta en que si se calienta mucho un gas, sus moléculas adquieren suficiente velocidad para ionizar a otras al colisionar con ellas. La ionización térmica es uno de los factores más influyentes en la ionización cuando hay fuego o cuando se dan arcos de alta presión.

En este tipo de ionización hay que tener en cuenta la recombinación de los iones positivos con los electrones (negativos), que en muchos casos anulan o compensan a los iones formados. Saha desarrolló la expresión que indica el grado de ionización (θ) en términos de la presión del gas y de la temperatura absoluta, mostrada a continuación [Kuffel00].

$$\frac{\theta^2}{1 - \theta^2} = \frac{2.4 \cdot 10^{-4}}{p} \cdot T^{5/2} \cdot e^{-W_i/k \cdot T} \quad (5)$$

Donde p es la presión en Torricelli (ó mm-Hg), W_i es la energía de ionización del gas, k es la constante de Boltzmann y θ es la relación n_i/n donde n_i es el número de partículas ionizadas de las n partículas totales.

Si se sustituyen los valores de W_i , k , T y p se puede apreciar que la ionización térmica se vuelve relevante para valores de T superiores a 1000 °K.

Para más información sobre la ionización térmica ver [Landau01].

2.1.6. Desionización por recombinación

La desionización es la operación inversa a la ionización. Se trata de la unión de dos partículas con carga opuesta. Este proceso es importante porque puede disminuir o incluso anular los efectos de la ionización. En un mismo instante se pueden estar dando los dos procesos a la vez en el seno del mismo gas. La energía potencial y cinética de las partículas que se unen se transforma en energía de radiación, que se libera y puede dar lugar a otras reacciones con otras partículas. El grado de recombinación es directamente proporcional al número de iones positivos y negativos inmersos en el proceso. La

desionización o recombinación es más relevante a altas presiones, donde la difusión no es muy importante.

Un mayor detalle de los tipos de reacciones que se pueden ocasionar y de las condiciones que las propician se puede encontrar en [Kuffel00] y [Albert72].

2.1.7. Desionización por adhesión de electrones

Otra forma de desionización es la que se da cuando un átomo en su estado gaseoso toma un electrón libre para formar un ión negativo estable. Este caso se da con gases que no tienen completa su última capa electrónica y tienen tendencia a adquirir electrones para completarla. Este tipo de gases se conocen como electronegativos y son los formados por los elementos halógenos (F, Cl, Br, I y At), que les falta un electrón para completar su última capa, y por otros como el S, O y Se, que tienen tendencia a adquirir dos electrones.

Hay varios tipos de mecanismos que dan lugar a la desionización por la formación de iones negativos al asimilar electrones.

Si se desea conocer en detalle los tipos de transiciones y las posibilidades de enlace en función de los átomos que forman parte del proceso se recomienda ver [Kuffel00].

2.2. DESPRENDIMIENTO DE LOS ELECTRONES DEL CÁTODO

Los electrodos, y en particular el cátodo, tienen un papel muy importante en las descargas eléctricas, ya que suministran electrones desde el inicio hasta el final de la descarga. Para que los electrones abandonen el electrodo se precisa una cierta energía (función de trabajo) para arrancar al electrón de su nivel de Fermi. La cantidad de energía precisada (W_a) es característica de cada material y puede ser suministrada por diferentes medios. Algunos de estos medios se explican a continuación.

2.2.1. Emisión fotoeléctrica

Los electrones pueden saltar de la superficie del cátodo por el impacto de fotones sobre la misma, cuando la energía de los fotones incidentes (en su mayor parte se trata de energía cinética) es mayor que la función de trabajo ($h\nu > W_a$). En la Tabla 1 [Kuffel00] se muestra la función de trabajo de algunos elementos.

Tabla 1. Función de trabajo para elementos típicos

<i>Element</i>	<i>Ag</i>	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>W</i>
W_a (eV)	4.74	2.98–4.43	4.07–4.7	3.91–4.6	4.35–4.6

Los valores representados en la tabla anterior son sensibles a los contaminantes. El valor de la función de trabajo cuando hay contaminantes queda reflejado en la Tabla 1 al lado del valor sin contaminantes, separado por un guión. Los valores de esta tabla muestran por tanto el umbral de energía mínimo que debe alcanzar un fotón para que al chocar contra el cátodo libere un electrón de su superficie.

Para obtener más información sobre este fenómeno ver [Hlawiczka77], [Llinares97] y [Kuffel00].

2.2.2. Emisión de electrones por el impacto de iones positivos y átomos excitados.

Los electrones pueden ser emitidos de las superficies metálicas cuando éstas son bombardeadas con iones positivos o átomos metaestables. Para que el ión positivo cause la emisión de un electrón libre debe desprender dos, ya que uno de ellos deberá neutralizar la carga positiva del propio ión. Por lo tanto la energía que necesita el ión (suma de la energía cinética y potencial) es el doble que la de la función de trabajo. El desprendimiento de electrones por el impacto de iones positivos en el cátodo es el principal motivo que explica el proceso secundario de descarga descrito por Townsend (ver apartado 2.3.2).

2.2.3. Emisión térmica

Otro mecanismo que puede provocar la liberación de electrones es el relativo a la temperatura que alcanza el electrodo. Al calentar un metal, en su interior los electrones se mueven más rápidamente, debido al efecto térmico. Algunos electrones alcanzan una energía tal que pueden abandonar el metal. Para que haya emisión térmica, la temperatura debe ser mayor que 1500 °K. Richardson [Kuffel00], [Agustín00] desarrolló la expresión que relaciona la corriente creada por este efecto en función de la temperatura y se ve representada en la Ecuación (6).

$$J_s = A \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{k \cdot T}\right) \left[\frac{A}{m^2}\right] \quad (6)$$

Siendo A:

$$A = \frac{4 \cdot \pi \cdot m \cdot e \cdot k^2}{h^3} \quad (7)$$

Donde m y e son la masa y carga de un electrón respectivamente, h es la constante de Planck, k es la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta y W_a es la función de trabajo superficial.

Esta expresión muestra que la densidad de corriente de saturación aumenta al aumentar la temperatura o disminuir la función de trabajo.

Los valores experimentales calculados son menores que los esperados por esta fórmula. La discrepancia es debida a la naturaleza de los electrones, que no siempre son liberados si no que a veces, aunque tengan la energía suficiente para poder liberarse, son reflejados y devueltos al sólido por los átomos de la superficie o los contaminantes. Para tener en cuenta estas consideraciones se sustituye A en la *Ecuación (6)* por A_{ef} :

$$A_{ef} = A(1 - R) \quad (8)$$

R representa probabilidad de reflexión de los electrones. Ante la presencia de un campo eléctrico fuerte la función de trabajo disminuye y el efecto de la emisión térmica se ve incrementado.

2.2.4. Emisión por campo

Al aplicar un campo eléctrico fuerte a un metal (cátodo) se produce el efecto Schottky [Burbano03], [Kuffel00], [Llinares97]. Éste efecto explica la emisión de electrones desde la superficie del metal al aplicar un fuerte campo eléctrico. El campo eléctrico provoca la disminución de la barrera de potencial de la superficie del metal, lo cual aumenta considerablemente la probabilidad de que los electrones se liberen atravesando esta barrera por el efecto túnel. Este proceso es independiente de la temperatura. La intensidad del campo eléctrico que se tiene que aplicar para que produzca la emisión electrónica es del orden de 10^9 V/cm.

Tanto los iones positivos como los fotones y los átomos metaestables contribuyen en la segunda ionización. La mayor relevancia de cada uno de ellos depende de las condiciones del entorno.

2.3. FORMACIÓN DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS

2.3.1. Coefficiente de la primera ionización de Townsend

Las descargas eléctricas, tanto las disruptivas como las parciales, tienen lugar debido a la ionización de los átomos del aislante o dieléctrico que separa dos superficies con diferente potencial. Pueden verse con mayor detalle los estudios realizados por Townsend al respecto en [Haq95], [Albert72], [Kuffel00], [Haq95] y [Torres02].

Townsend descubrió que existe una relación entre la corriente que atraviesa el espacio entre dos conductores planos y la diferencia de potencial aplicada en los mismos. Esta relación se muestra en la Figura 3 [Kuffel00], mostrada a continuación.

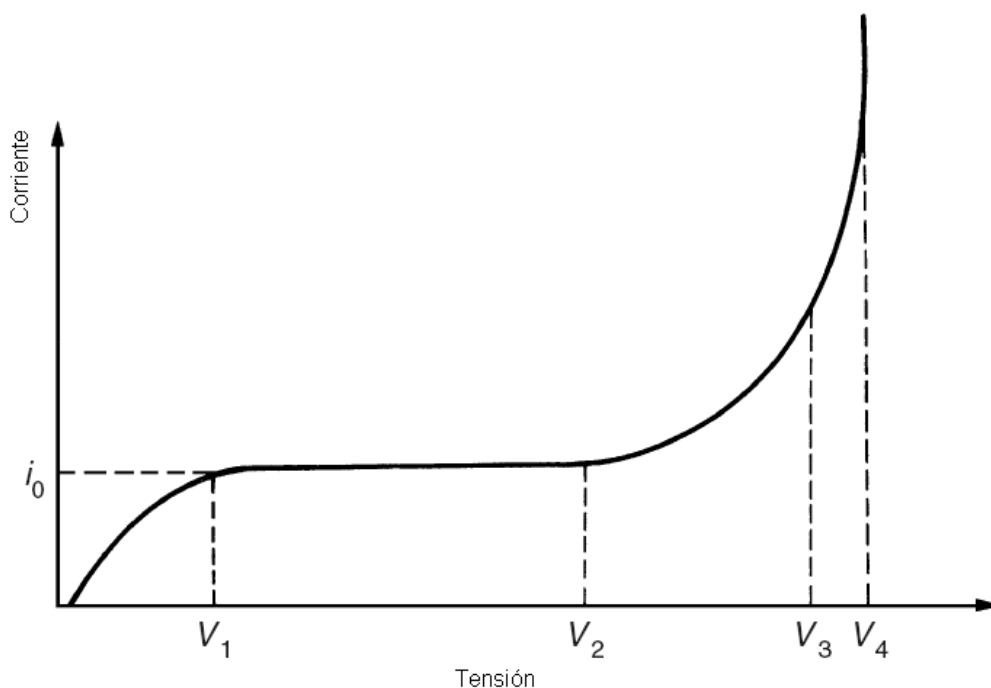


Figura 3. Relación entre la corriente y la tensión entre dos conductores planos antes de la descarga

Tal y como muestra en la figura anterior, Townsend descubrió que el aumento de la corriente con la tensión tiene tres tramos diferenciados, hasta que se produce la descarga eléctrica o ruptura del aislante. En el primer tramo ($0-V_1$), la corriente aumenta casi directamente proporcional a la tensión aplicada. Este transporte de la corriente es debido a la formación natural de los iones libres en el aire. Cuando se alcanza el valor de corriente de saturación, representado en la figura por i_0 , comienza el segundo tramo (V_1-V_2) en el cual la corriente permanece casi constante. Si se aplican tensiones mayores a V_2 de forma mantenida, se alcanzan valores de corriente superiores a i_0 . En este tercer tramo, a partir de V_2 , la corriente aumenta de forma exponencial al aumentar la tensión aplicada.

Townsend atribuyó el aumento de la corriente a partir de V_2 (Figura 3) a la ionización del gas (aislante que separa los conductores) por la colisión de los electrones. Supuso que al aumentar la tensión y aumentar por lo tanto el campo eléctrico, los electrones adquirirían más velocidad y alcanzaban suficiente energía en los choques para poder ionizar a las partículas del gas por colisión.

Para explicar este comportamiento Townsend definió el valor α , conocido como “coeficiente de la primera ionización de Townsend”. Este coeficiente representa el número de electrones libres que es capaz de producir un electrón por unidad de longitud de camino libre, en la dirección del campo eléctrico aplicado.

La Ecuación (9) representa su aplicación y significado a la hora de comprender el comportamiento de la multiplicación electrónica en las descargas eléctricas. En dicha ecuación n es el número de electrones a una distancia x del cátodo en la dirección del campo eléctrico aplicado; dn representa el incremento de electrones en la longitud dx , ver Figura 4(a):

$$dn = \alpha \cdot n \cdot dx \quad (9)$$

Si integramos esta expresión en función de la distancia obtenemos la *Ecuación (10)* [Kuffel00], [Hlawiczka77], [Haq95]:

$$n = n_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (10)$$

O en términos de corriente:

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \quad (11)$$

Donde n_0 es el número de electrones que abandonan inicialmente el cátodo y $e^{\alpha \cdot d}$ es conocido como “avalancha” y representa el número de electrones libres producidos por un electrón en el viaje desde el cátodo hasta el ánodo. La Figura 4 [Kuffel00] muestra un esquema de este proceso de avalancha.

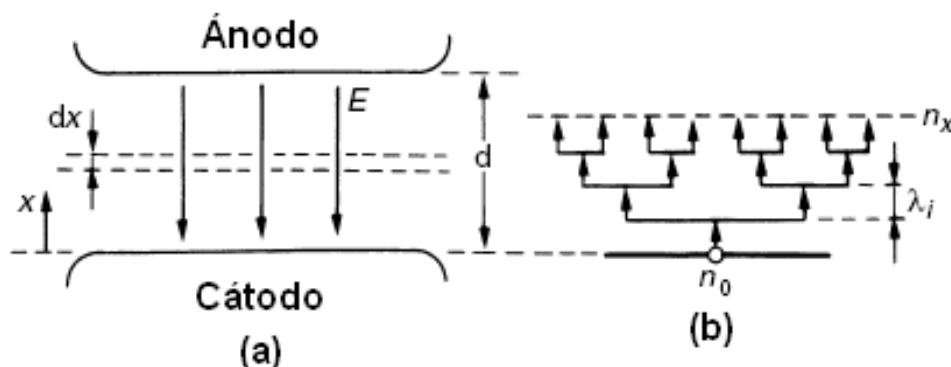


Figura 4. Creación de electrones libres en el proceso de avalancha.

Como ya vimos en la *Ecuación (3)* cuando la temperatura es constante en un determinado gas, la distribución de energía ΔW sólo depende de E/p . El primer coeficiente de ionización de Townsend (α), depende tanto de la densidad del gas aislante o presión p como de la energía que es capaz de ganar el electrón en las colisiones con los átomos del gas. Por lo tanto podemos expresar este coeficiente como muestran la *Ecuación (12)* y *Ecuación (13)* [Kuffel00], [Torres02]:

$$\alpha = p \cdot f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (12)$$

ó

$$\frac{\alpha}{p} = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (13)$$

Donde E es la intensidad del campo eléctrico aplicado. Por lo que se puede entender el coeficiente de la primera ionización de Townsend como la probabilidad de ionización por colisión.

Desarrollando la Ecuación (1) para $\sigma = \sigma_i$ el área real de ionización por colisión y $N = p/k \cdot T$ la densidad del gas aislante obtenemos [Kuffel00], [Torres02]:

$$\frac{\alpha}{p} = \frac{\sigma_i}{k \cdot T} e^{-(\sigma_i/k \cdot T) \cdot [V_i/(E/p)]} = A_{(T)} \cdot e^{-[B_{(T)}/(E/p)]} \quad (14)$$

Donde $A_{(T)} = \frac{\sigma_i}{k \cdot T}$; $B_{(T)} = \frac{V_i \cdot \sigma_i}{k \cdot T}$. Siendo k la constante universal de Boltzman y T la temperatura del gas.

Esta dependencia existente entre α/p y E/p no se cumple exactamente para todo el rango de E/p ya que existen fenómenos que participan en la ionización que no se están teniendo en cuenta en esta correlación. La Ecuación (14) [Kuffel00] puede determinar el proceso de ionización para ciertos rangos incluso tomando A y B como constantes. Algunos valores de estas constantes calculados experimentalmente para los gases más comunes dentro de los rangos especificados se muestran a continuación en la Tabla 2 [Kuffel00].

Tabla 2. Constantes de ionización A y B para T=20°C

<i>Gas</i>	<i>A</i> <i>ion pairs</i> <i>cm⁻¹ Torr⁻¹</i>	<i>B</i> <i>V cm⁻¹</i> <i>Torr⁻¹</i>	<i>E/p range</i> <i>V cm⁻¹ Torr⁻¹</i>	<i>V_i</i> <i>volts</i>
H ₂	5	130	150–600	15.4
N ₂	12	342	100–600	15.5
air	15	365	100–800	–
CO ₂	20	466	500–1000	12.6
He	3	34	20–150	24.5
Hg	20	370	200–600	–

El hecho de que los valores teóricos de A y B difieran de los experimentales es debido a las consideraciones estimadas, tales como que todos los electrones que alcanzan el nivel de energía $e \cdot V_i$ se ionizan, siendo la probabilidad real máxima de 0.5 cuando la energía que alcanza el electrón es de 4 a 6 veces la de ionización ($e \cdot V_i$). También se ha supuesto que los caminos libres principales son independientes de la energía de los electrones, lo cual no es cierto. Un análisis más exhaustivo tendría que tener en cuenta la dependencia de la sección de ionización por colisión (σ_i) con la energía de los electrones.

En la Figura 5 [Kuffel00], podemos ver la relación entre α/p y E/p tomando los valores de A y B experimentales para el N_2 y el H_2 a $T=0^\circ C$.

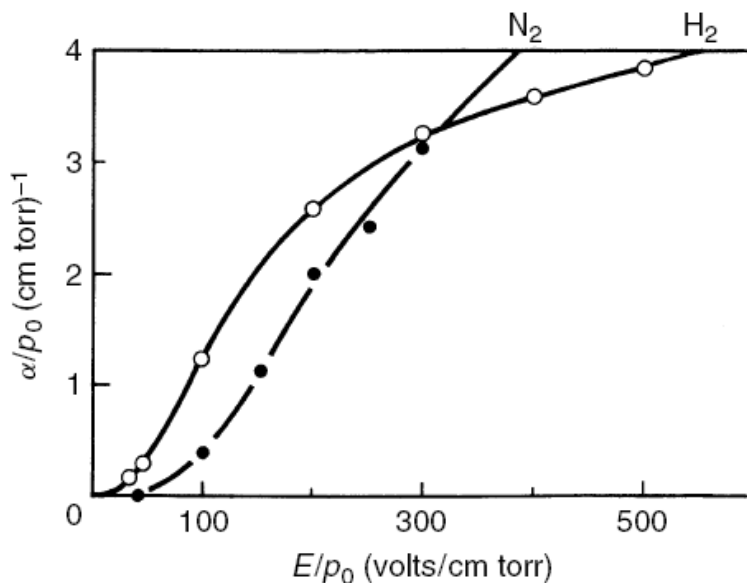


Figura 5. Relación entre α/p y E/p para el H_2 y N_2 a $T=0^\circ C$

De esta figura se puede concluir que la probabilidad de ionización aumenta al aumentar el campo eléctrico, aunque de manera diferente para cada gas.

2.3.2. Segundo coeficiente de ionización de Townsend y

Cuando Townsend representó el $\log I$ frente a la distancia de separación de los electrodos d , para una presión dada p y manteniendo el campo eléctrico E constante (Ecuación (15)), se percató de que a partir de cierto valor de d el crecimiento de la corriente era mayor al esperado por la Ecuación (15). La representación se puede apreciar en la Figura 6 [Haq95], [Kuffel00].

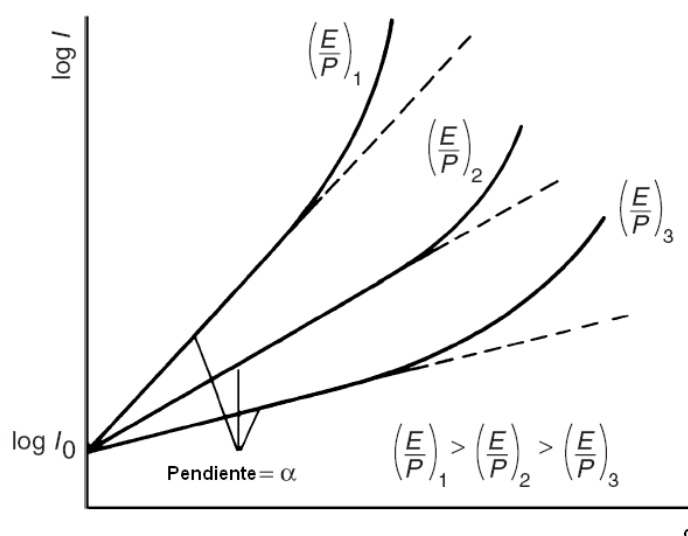


Figura 6. Variación de la corriente en función de la separación entre los electrodos, con campo y presión uniformes

Para explicar el alejamiento de la linealidad, Townsend postuló que un segundo mecanismo debía estar afectando a la corriente de la descarga eléctrica. La conclusión a la que llegó fue que nuevos electrones estaban participando en el proceso de descarga aparte de los producidos por la ionización del gas aislante. Consideró que este aporte extra de electrones eran liberados del cátodo por los métodos mostrados anteriormente (ver apartados 2.1 y 2.2). Otros procesos causantes del aumento de la corriente en la Figura 6 es el debido a la fotoionización del gas, la emisión secundaria de electrones del cátodo por el impacto de fotones, e incluso el efecto de los metaestables. El mecanismo secundario predominante depende de las condiciones del entorno, tales como la presión, el campo eléctrico aplicado, la forma y composición de los electrodos... Además puede haber más de un mecanismo que participe en la ionización secundaria dentro del gas que separa los electrodos. El coeficiente de la segunda ionización descrito por Townsend (γ) incluye a todos los mecanismos que están participando en la ionización secundaria. La corriente puede expresarse mediante la *Ecuación (15)* [Kuffel00], [Hlawiczka77], [Torres02]:

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (15)$$

Donde I es la corriente que atraviesa el aislante, I_0 es la corriente que inicialmente abandona el cátodo (sin tener en cuenta el efecto de la ionización secundaria), α es el coeficiente de la primera ionización de Townsend, d es la distancia de separación entre electrodos y γ es el coeficiente de la segunda ionización de Townsend. Éste coeficiente está muy influenciado por la naturaleza de la superficie del cátodo. Cuanto menor es la función de trabajo (energía necesaria para liberar un electrón de la superficie del cátodo), mayor será la emisión de electrones producida, ante las mismas condiciones. El valor de γ es pequeño para valores pequeños de E/p y aumenta al aumentar E/p . Esto es debido a que cuanto mayor sea E/p habrá mayor número de iones positivos y fotones con la energía suficiente para liberar los electrones de la superficie del cátodo. En la Tabla 3 [Torres02] se ve la influencia de la superficie del cátodo en el valor de γ .

Tabla 3. Influencia de la superficie del cátodo en el valor de γ

Gas	Cátodo	V_m [Voltios]	E/p [V/cm.Torr]	γ
Aire contaminado con vapor de Hg	Amalgama de cobre	460	720	0.004
	Película de Hg sobre aluminio	390	885	0.014
	Película de Hg sobre níquel	390	885	0.014
	Película de Hg sobre acero staybrite	390	585	0.006
Aire	Aluminio oxidizado	416	905	0.010
	Níquel oxidizado	421	957	0.010
	Aluminio	-	-	0.035
	Cobre	-	-	0.025
	Hierro	-	-	0.010
Hidrógeno	Aluminio	243	200	0.100
	Aluminio depositado sobre níquel	212	200	0.150
	Níquel	289	180	0.075
	Níquel depositado sobre aluminio	390	245	0.015
	Aluminio comercial	225	200	0.125
	Aluminio sobre acero staybrite	205	210	0.150
	Acero staybrite	274	190	0.075
	Acero depositado sobre aluminio	282	190	0.075
	Cobre	-	-	0.050
	Hierro	-	-	0.060
Nitrógeno	Aluminio	-	-	0.100
	Cobre	-	-	0.065
	Hierro	-	-	0.060

Siendo V_m el tensión mínimo de ruptura del aire.

2.3.3. Criterio de formación de descarga de Townsend

Al aumentar la tensión entre dos electrodos separados por aire, la corriente responde a la *Ecuación (15)*. A partir de dicha ecuación y mediante un desarrollo matemático (ver [Kuffel00], [Hlawiczka77], [Torres02]) se obtiene que el criterio de descarga de Townsend es:

$$\gamma(e^{\bar{\alpha} \cdot d} - 1) = 1 \quad (16)$$

Donde $\bar{\alpha}$ representa el coeficiente de la primera ionización de Townsend efectivo y γ es el coeficiente de la segunda ionización. Si $\gamma(e^{\bar{\alpha} \cdot d} - 1) = 1$ el número de pares de iones producidos en el aire por el paso de la avalancha electrónica es suficientemente grande como para que los iones positivos resultantes puedan, por el bombardeo del cátodo, liberar un electrón secundario de la superficie del mismo que cause un nuevo proceso de avalancha. Éste electrón secundario puede provenir también de la fotoionización. Si esto sucede la descarga puede auto sustentarse, es decir,

puede mantenerse sin el aporte de la fuente que la originó (produjo I_0). Por lo que la Ecuación (16) representa el umbral para la descarga. Si $\gamma(e^{\bar{\alpha} \cdot d} - 1)$ es mayor que uno, la descarga crece muy rápidamente, es decir, el número de avalanchas sucesivas producidas es cada vez mayor. Si por el contrario tenemos que $\gamma(e^{\bar{\alpha} \cdot d} - 1) < 1$ la descarga no se auto sustenta, es decir, que si eliminamos la fuente de energía que crea I_0 la descarga termina por extinguirse.

2.3.4. Teoría de canales para la descarga eléctrica en gases

La teoría sobre el mecanismo de descargas eléctricas formulado por Townsend no tiene en cuenta el campo eléctrico creado por los portadores de carga en el transcurso de la avalancha. La teoría de canales surge para explicar algunos fenómenos de la ruptura dieléctrica, que bajo ciertas condiciones de presión, la teoría de Townsend no aclara satisfactoriamente. Según Townsend la ruptura debe producirse después del tiempo de tránsito del electrón t_i , o por lo menos en ese tiempo. Sin embargo en ocasiones la ruptura tiene lugar en un tiempo inferior a t_i y sin presentarse efectos secundarios o de emisión catódica. La teoría de canales explica este tipo de ruptura tanto si los canales están dirigidos al cátodo como si están dirigidos al ánodo. En los siguientes párrafos se detallan ambas teorías.

2.3.4.1. *Canal dirigido al cátodo*

Desarrollado por Loeb y Meek [Torres02] para un campo uniforme, se describe como el volumen de cargas positivas que deja la avalancha electrónica en el entrehierro al ser las cargas negativas absorbidas por el ánodo. Esta distribución de cargas tiene forma cónica, tal y como se ve en la Figura 7(a) [Torres02].

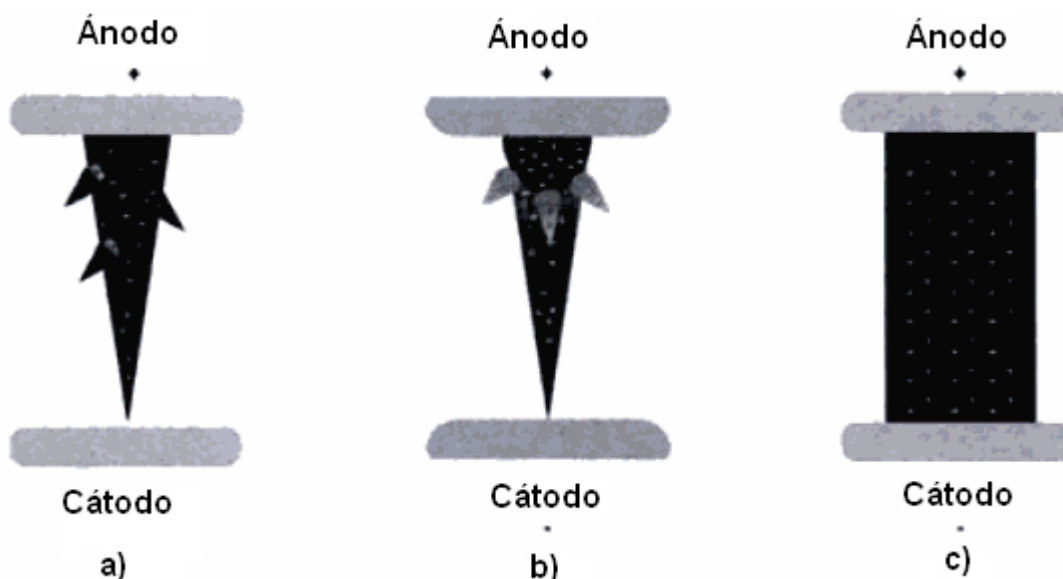


Figura 7. Teoría de canales para la descarga eléctrica en gases. Canal dirigido al cátodo

Esta región de cargas positivas no es suficiente para producir la descarga, puesto que su densidad es muy baja. No obstante, en el gas que se encuentra alrededor de la avalancha, se producen procesos de fotoionización, generando electrones que sí tienen alta densidad. Las avalanchas “auxiliares”, producidas por estos electrones, se generan alrededor de la avalancha principal, intensificando la carga espacial en la dirección al cátodo (Figura 7(b)). Este proceso es, a su vez, ayudado por el refuerzo de campo que produce la carga espacial. El proceso continúa hasta producirse un canal de ionización que se extiende desde el ánodo hasta el cátodo (Figura 7(c)).

2.3.4.2. Canal dirigido al ánodo

Raether observó que cuando la concentración de portadores de carga en una avalancha (N_{pc}) es del orden de 10^6 - 10^8 el efecto avalancha se suaviza, mientras que si es mayor a 10^8 la corriente de la avalancha sufre un aumento en escalón, con lo que se produce la ruptura del aislante [Torres02], [Kuffel00]. Tanto el crecimiento por debajo de la exponencial (crecimiento de la avalancha esperado por Townsend, $e^{\alpha \cdot d}$), como el aumento en escalón se atribuyen al cambio del campo eléctrico externo E_0 por la distorsión que crea el campo eléctrico interno formado por los portadores de carga sobre éste.

Durante la avalancha los portadores de carga se desplazan a diferentes velocidades. En este desplazamiento los iones positivos se mueven hacia el cátodo y los electrones hacia el ánodo. Este hecho provoca una concentración de carga en el espacio interelectródico. La separación de las cargas crea un campo eléctrico interno que es capaz de distorsionar el campo eléctrico externo, aumentándolo en los extremos de las dos nubes de portadores y debilitándolo en medio de ellas. Dicha distorsión se representa en la Figura 8 [Torres02].

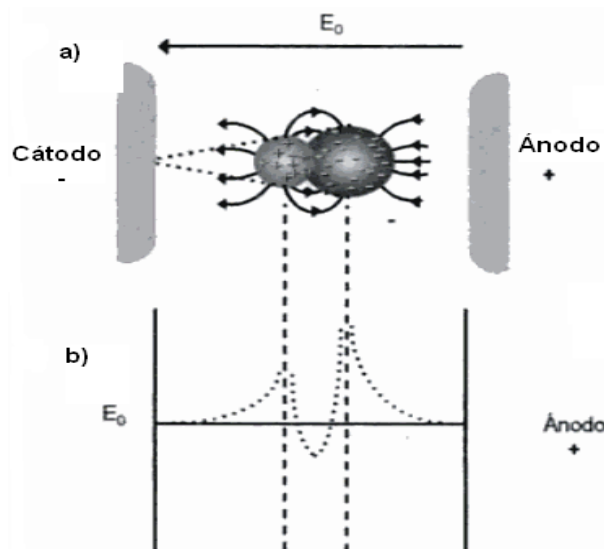


Figura 8. a) Formación de la carga espacial debida a la avalancha de electrones. b) Distorsión del campo eléctrico E_0 debido al campo eléctrico asociado a la carga espacial

En la figura anterior se puede apreciar que el campo externo E_0 se distorsiona a lo largo del entrehierro. En la cabeza de la avalancha se encuentran los portadores de carga negativa, que por un lado se encuentran atraídos por el ánodo (representado en la segunda “cima” por encima de E_0 en la Figura 8.b)) y por otro lado por los portadores de carga positiva (espacio más próximo entre las esferas de carga, se corresponde con la parte por debajo de E_0 en la Figura 8.b)). En la cola de la avalancha se encuentran los portadores de carga positiva, que también se ven atraídos hacia los portadores negativos y hacia el cátodo (ver Figura 8.b)). La distorsión que disminuye el campo externo E_0 , es la que hace que se frene el proceso de descarga eléctrica (crecimiento por debajo de la exponencial), mientras que la distorsión creada por la atracción de los electrodos puede aumentar tanto el campo que produzca la descarga “instantánea” o descarga por canal.

La hipótesis del mecanismo de canales de este tipo se fundamenta en la existencia de una primera ionización por impacto, de acuerdo con el segundo coeficiente de Townsend, y la fuerte ionización en la cabeza de la carga espacial, debida al efecto fotoeléctrico. Tal y como se muestra en la Figura 8.a), la carga de los portadores se separa en dos esferas. Debido a que la velocidad de los portadores de carga negativa (electrones) es mayor que la de los de carga positiva, la carga espacial negativa siempre irá más adelantada. El tamaño y la forma de las cargas espaciales dependen de variables como la temperatura, la movilidad y la difusión, la densidad del gas...

Este mecanismo de descarga tiene gran relevancia en las descargas parciales, principalmente en las producidas con campos no uniformes. Para profundizar en las definiciones analíticas ver [Kuffel00].

Algunas de las principales diferencias entre la teoría de Townsend y la de canales son:

- Para que la avalancha de Townsend se transforme en canal debe alcanzarse una concentración mínima de portadores de carga (N_{pc}) que es $N_{pc} > 10^8$.
- La descarga por canales es más rápida que por Townsend. Se estima que por el mecanismo de canales se produce la descarga en valores cercanos a 10^{-7} segundos, mientras que para el mecanismo de Townsend es del orden de 10^{-5} segundos, en una separación de un centímetro y bajo unas condiciones normales de presión.
- El mecanismo de canales tiene su fundamento en la consideración de la carga espacial.
- El mecanismo de descarga por canales se da cuando los efectos en el gas (fotoionización, ionización por iones positivos,...) predominan sobre los secundarios en los electrodos (incidencia de iones, fotoemisión,...).

Es necesario mencionar que se han encontrado algunas inconsistencias en la formulación de la teoría formulada por Meek [Torres02] sobre la formación de la descarga eléctrica, pero debido al carácter general de ésta se sigue empleando mientras se realizan estudios más profundos al respecto.

2.3.5. Criterio de descarga en campos no uniformes

Los campos uniformes son los creados por las disposiciones de electrodos de punta-plano, esfera-plano o cilindros coaxiales entre otros. En ellos tanto el campo eléctrico como el primer coeficiente de ionización efectivo ($\bar{\alpha}$) varían a través del aislante que separa los electrodos. Para bajas presiones el criterio de descarga de Townsend es [Kuffel00]:

$$\gamma \left[\exp \left(\int_0^d \bar{\alpha} \cdot dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (17)$$

Donde d es la longitud del entrehierro.

La integral debe hacerse a lo largo de la línea de mayor campo. La expresión es también válida para presiones mayores si el campo es ligeramente no uniforme.

Cuando la fuerza del campo cae por debajo de un cierto valor E_c , la integral de la ecuación anterior (17) deja de existir. Es entonces cuando el mecanismo de Townsend pierde su validez, ya que sólo dependería de γ .

Si queremos describir el caso más general (teniendo en cuenta campos no uniformes), obtenemos que la expresión que representa el criterio de descarga es la mostrada en la Ecuación (18) [Kuffel00]:

$$\exp \int_0^{x_c < d} \bar{\alpha} \cdot dx = N_{pc} \quad (18)$$

Donde N_{pc} es la concentración crítica de electrones en una avalancha, es decir, la concentración de electrones que permite la creación de un canal para que se produzca la descarga “instantánea” (streamer), que aproximadamente es del orden de 10^8 (ver apartado 2.3.4), x_c es el camino que recorre la avalancha hasta alcanzar ese tamaño y d es la longitud de separación de los conductores. Si $x_c > d$ la descarga por canales no se producirá. La ecuación anterior (18) se suele expresar también como [Kuffel00]:

$$\int_0^{x_c < d} \bar{\alpha} \cdot dx = \ln N_{pc} \approx 18 - 20 \quad (19)$$

La Ecuación (19) se puede emplear tanto para el cálculo de la tensión de ruptura (descarga disruptiva) como para el de descarga parcial.

En la Figura 9 [Kuffel00] se muestra una distribución de campo con disposición punta-plano. En la gráfica inferior se representa el valor del campo a lo largo de la separación de los electrodos. Puede apreciarse una gran no uniformidad. Basándonos en esta figura es más fácil comprender el significado de las expresiones mencionadas anteriormente (Ecuación (17), (18) y (19)).

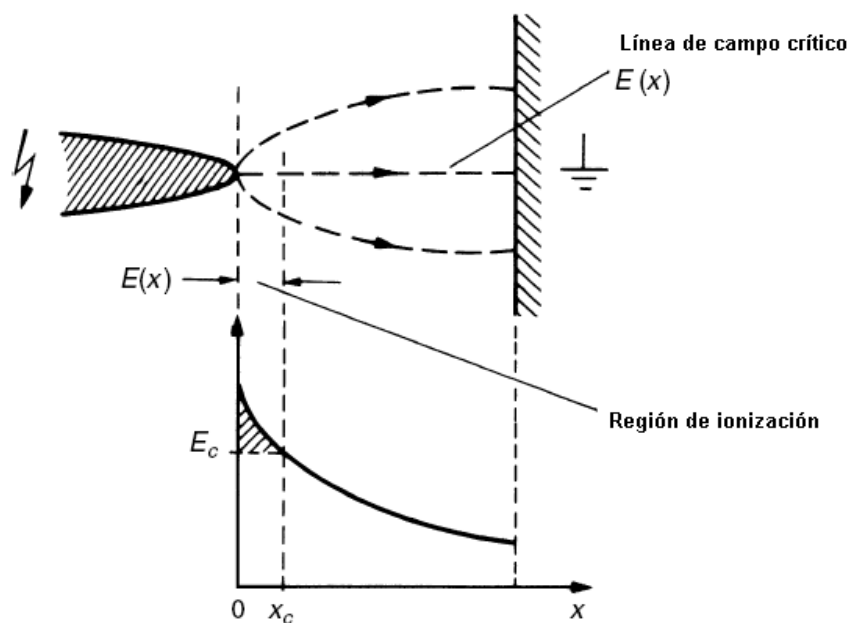
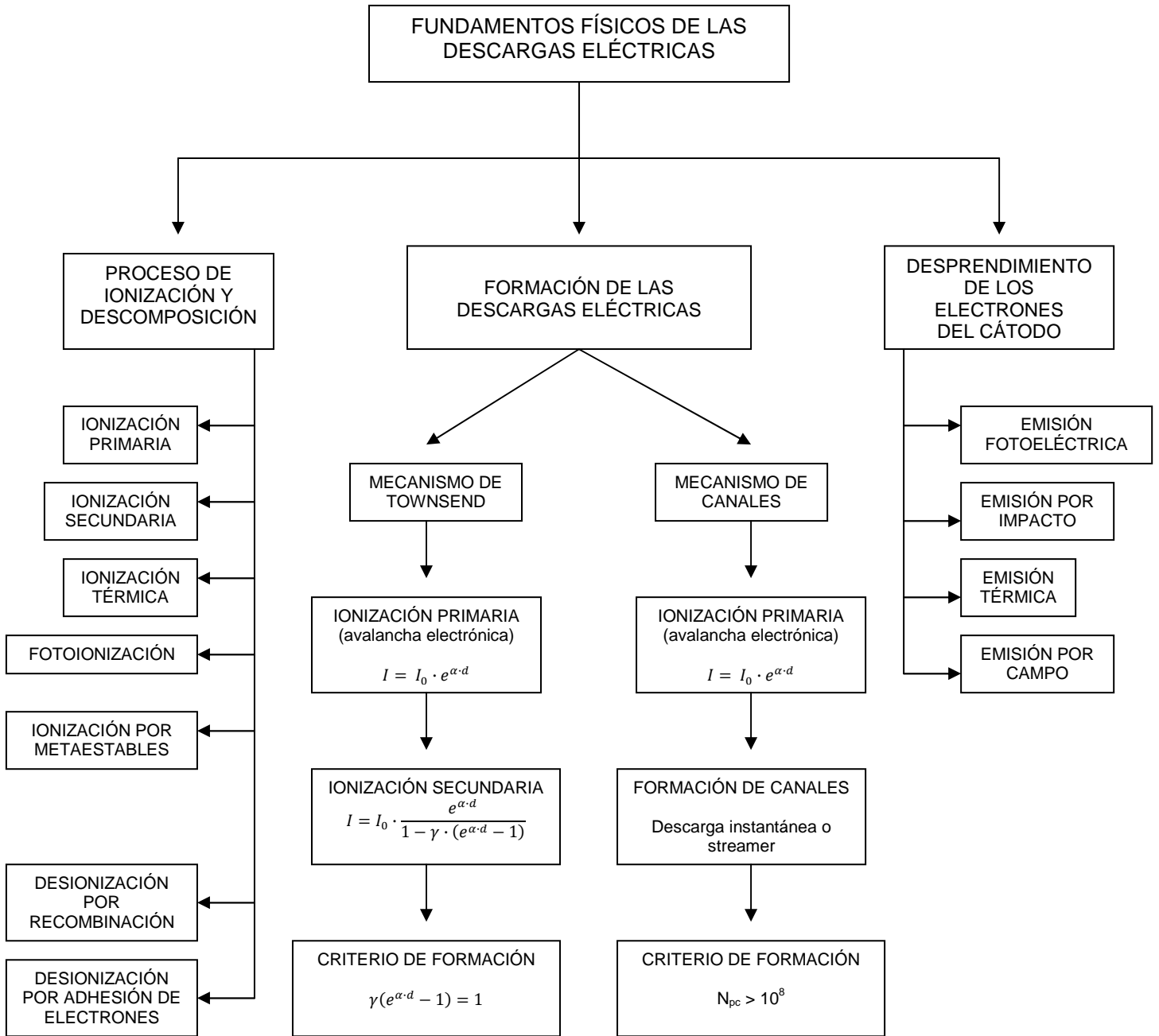


Figura 9. Distribución de campo no uniforme con disposición de punta-plano

Se producirá la descarga eléctrica sólo si en el espacio x_c la avalancha ha logrado obtener una concentración de electrones suficiente para que se cree un canal de descarga (ver apartado 2.3.4). Dado que a esa separación del electrodo emisor de electrones el campo es menor que E_c , la fuerza de dicho campo ya no es suficiente para continuar ionizando el gas y por lo tanto la descarga no responde al mecanismo de ionización de Townsend (ver 2.3.3).

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS



CAPÍTULO III:
DESCARGAS PARCIALES

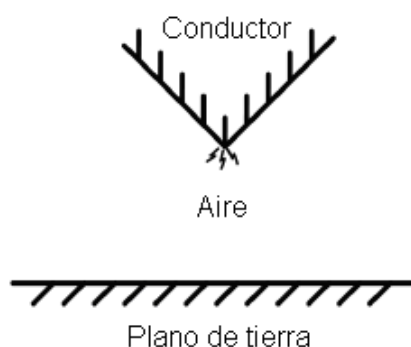
3. DESCARGAS PARCIALES

Las descargas parciales son pequeñas descargas eléctricas de duración transitoria en el estado estacionario, que se producen en el seno de un gas aislante debido a una diferencia de potencial en el mismo. En este tipo de descarga el aislante no es atravesado por completo por la corriente eléctrica, es decir, no se produce la ruptura del mismo. Suelen producirse en campos no uniformes y se pueden apreciar por los destellos luminosos y el ruido que producen. Las descargas parciales pueden presentar diferentes formas: corona, superficie, cavidad...

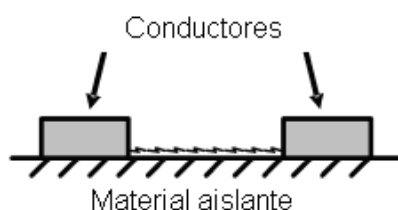
En la Figura 10 y Figura 11 [Cotton07], [Cotton08] se ilustran algunos de estos tipos de descargas.



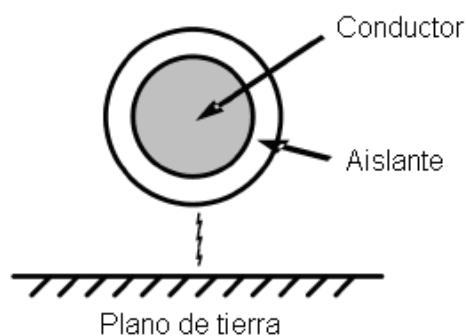
a) Huecos en el interior del aislamiento del cable



b) Descarga por efecto corona alrededor de un punto angular del conductor
(disposición de electrodos punta-plano)



c) Descarga por superficie entre dos conductores separados por el material aislante



d) Descarga parcial entre cable y plano
(disposición de electrodos cilindro-plano)

Figura 10. Tipos de descargas parciales



Figura 11. Ejemplo de descarga parcial

A las descargas parciales se las conoce comúnmente como coronas, aunque éste es sólo uno caso particular de descarga parcial. Las descargas parciales se pueden suceder en un avión durante periodos más o menos largos de tiempo, sin que por ello se produzca fuego. Lo que provocan principalmente este tipo de descargas es el deterioro de los aislantes, que facilita la aparición de descargas disruptivas.

3.1. TIPOS DE DESCARGAS PARCIALES O CORONAS

Hay dos tipos de descargas parciales claramente diferenciados, en función de la polaridad de la tensión aplicada, es decir la tensión del cable o conductor respecto del plano de tierra. Los casos que se explican a continuación muestran una disposición de los electrodos de punta-plano, ya que son muy apropiados para la aparición de las descargas parciales. Esto es debido a que esta disposición crea campos eléctricos de alta no uniformidad. En función de cómo se aplique la diferencia de potencial podemos tener descargas de impulso, cuando la tensión aplicada es en pulsos de corta duración, o las descargas de campo estático, cuando la tensión se aplica de forma continua (tensión DC).

El hecho de que la tensión aplicada sea continua o alterna no varía significativamente la apariencia de las descargas.

3.1.1. Descargas parciales positivas o de ánodo

Las descargas parciales de ánodo son las que se producen cuando la tensión del electrodo de punta es positiva. Es característico de este tipo de descargas que la señal luminosa emitida cubra la superficie del cable de forma uniforme y sea de color blanquiazul.

Ante una descarga de impulso con un nivel de tensión justo por encima del umbral de ionización, la monitorización precisa del crecimiento de la descarga es muy complicada. Tras las mejoras técnicas alcanzadas, ahora es posible una mejor comprensión de este tipo de descargas. La Figura 12 [Kuffel00] muestra un esquema de la formación y crecimiento de la descarga antes mencionada.

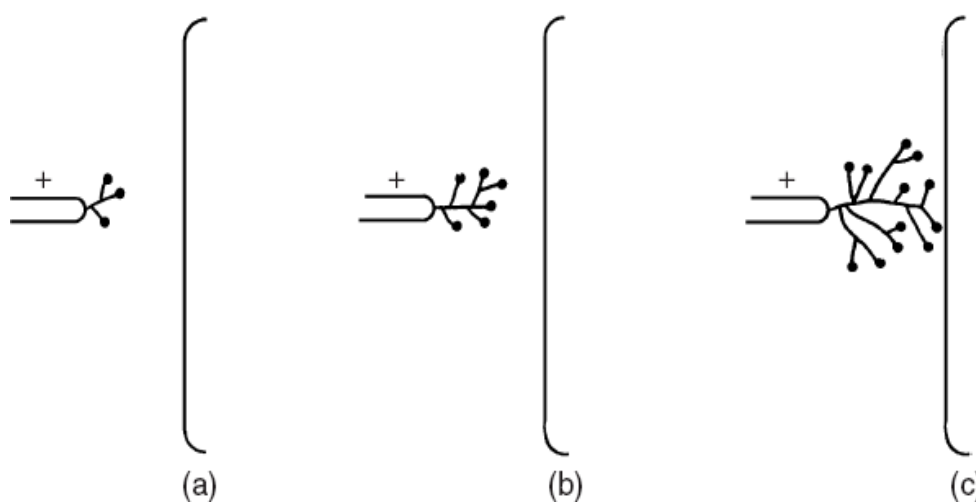


Figura 12. Ilustración esquemática de la formación de descargas de impulso de ánodo y disposición de electrodos de punta-plano

Investigaciones realizadas al respecto [Kuffel00] revelan que cuando se le aplica una tensión positiva a un electrodo de punta, el desarrollo de la descarga es en forma de árbol (ramificaciones). Este tipo de desarrollo de la descarga (Figura 12.a) es similar a la sufrida en campos eléctricos uniformes con relaciones de presión-separación de los electrodos ($p \cdot d$) elevadas (ver apartado 4.3). Cuanto mayor es el nivel de tensión aplicada, mayor es la longitud y número de ramificaciones (Figura 12 b y c). Una de las características más interesantes es que incluso con un alto número de ramas, éstas nunca se cruzan. La velocidad de propagación de las descargas disminuye rápidamente cuando nos alejamos de la zona con mayor campo eléctrico. En la Figura 13 [Kuffel00] se pueden apreciar dichas velocidades para dos tensiones de impulso diferentes, siendo el entrehierro de 2.5 cm.

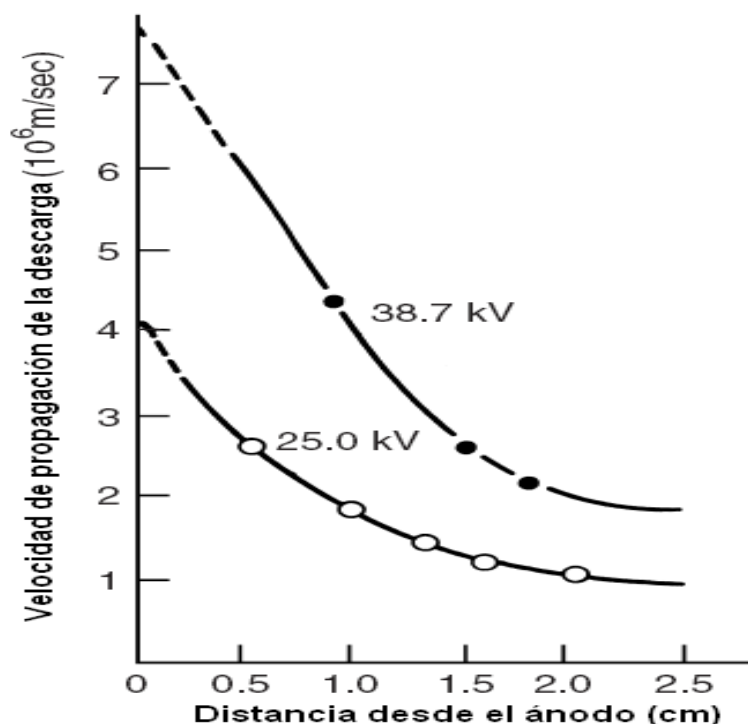


Figura 13. Velocidad de propagación de una descarga de ánodo con entrehierro de 2.5 cm de aire, bajo dos niveles de tensión diferentes

Tal y como se puede observar en la Figura 13 la velocidad va decreciendo a medida que la descarga va avanzando, esto es, cuando comienza la ionización, cerca del electrodo de punta se van formando las ramas que darán forma al desarrollo de la descarga. La formación y avance de estas primeras ramas (ver Figura 12.a)) se produce más rápidamente que su posterior desarrollo y avance (Figura 12.b) y c)) hacia el electrodo plano, debido a que el campo cerca del plano es menor. También se puede apreciar que la velocidad es mayor cuanto mayor es la tensión, es decir, el campo eléctrico aplicado entre los electrodos. Cuando la tensión aplicada es continua, los productos de la ionización tienen suficiente tiempo para crear acumulaciones de carga y distorsionar el campo eléctrico externo (aplicado). Si empleamos una disposición de electrodos de punta-plano y aplicamos este tipo de tensión estaremos ante el caso de descargas parciales de ánodo con campo estático. En este caso y tomando como radio del electrodo de punta 1 cm, podemos analizar los tipos de descargas en función del tensión aplicado y de la longitud de separación entre los electrodos. La gráfica está escalada usando como aislante el aire atmosférico (ver Figura 14 [Kuffel00]).

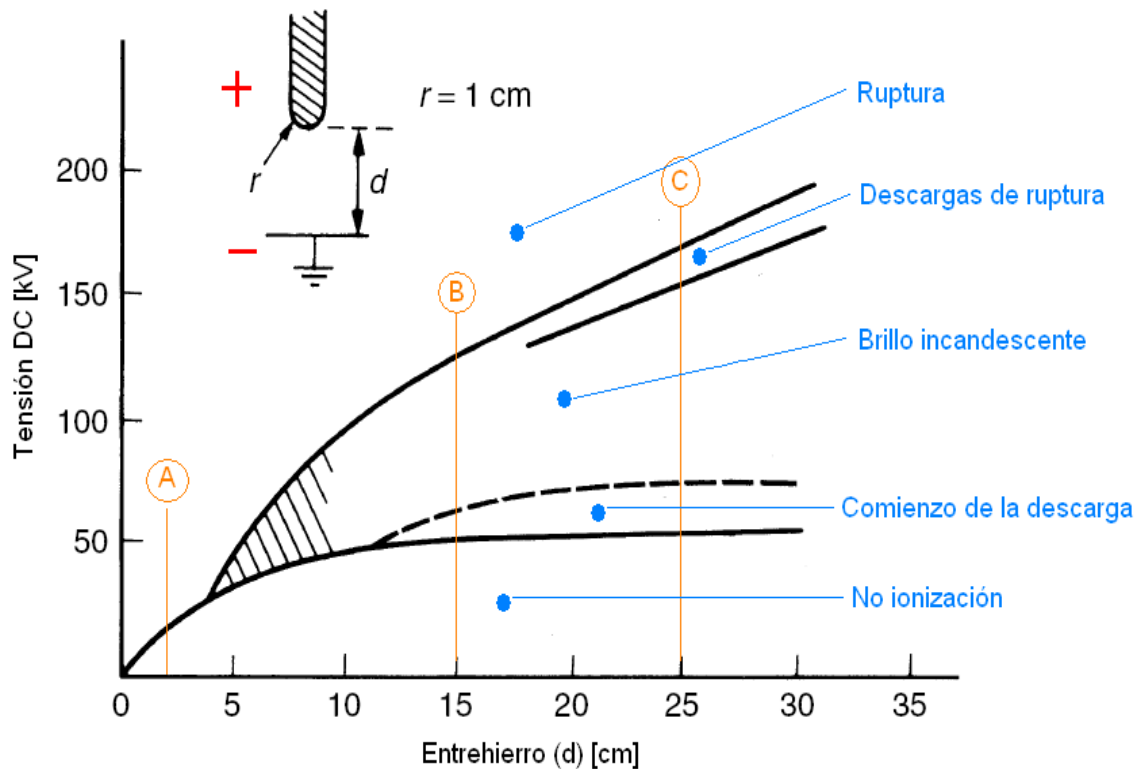


Figura 14. Transiciones en las descargas de ánodo

Si se aumenta gradualmente la tensión con una longitud de entrehierro fija y pequeña (ver caso (A) de la Figura 14), se produce la ruptura del aislante sin que se pueda apreciar ionización anterior ni descargas parciales. A medida que se aumenta la longitud del entrehierro la distribución del campo eléctrico en el mismo se va haciendo menos homogénea. Si vamos aumentando la tensión con un entrehierro de por ejemplo 15 cm (ver caso (B) de la Figura 14), llegaremos a un punto en el cual se empiezan a formar pequeñas ramificaciones de descarga. Estas ramificaciones son similares a las que encontraríamos si la tensión aplicada fuese de impulso (ver Figura 12). Hemos pasado del área de no ionización al de inicio de descarga. Este tipo de descargas ramificadas se dan de forma pulsos y no llegan a cubrir la longitud completa del entrehierro. Si seguimos aumentando la tensión entramos en la zona de brillo incandescente, donde la descarga se auto sustenta y crea un brillo incandescente. Si seguimos subiendo por la recta (B) la luminosidad aumenta, tanto en tamaño como en intensidad, hasta que se produce la ruptura total del aislante. En el caso (C) de la Figura 14 (entrehierro de 25 cm) el proceso es el mismo que en el caso (B), salvo porque antes de llegar a la descarga disruptiva o ruptura (ver capítulo 0) se producen otras descargas de árbol (zona de descargas de ruptura), éstas últimas de mayor intensidad y tamaño que las de inicio de descarga. El área sombreada de la Figura 14 representa una zona donde las transiciones de la descarga son inciertas.

3.1.2. Descargas parciales negativas o de cátodo

Las descargas parciales de cátodo son las que se producen cuando la tensión del electrodo de punta es negativa. Es característico de este tipo de descargas que la señal luminosa emitida forme pequeños puntos incandescentes de color rojo.

Cuando se tiene un montaje con electrodos de punta-plano y polaridad negativa la corriente fluye en pulsos regulares, siempre que la tensión sea superior a la de inicio del efecto corona, cuyas siglas en inglés son Corona Onset Voltage (COV). Estos pulsos llevan el nombre de su descubridor "Trichel" [Kuffel00]. La Figura 15 muestra la relación entre la frecuencia de dichos pulsos de corriente respecto de la tensión aplicada, para diferentes longitudes de entrehierro.

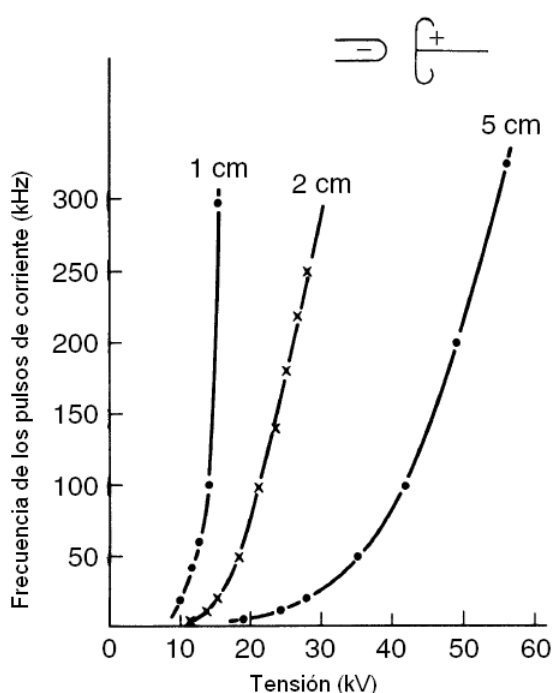


Figura 15. Relación entre la frecuencia de los pulsos de corriente Trichel y la tensión para diferentes longitudes de entrehierro de aire con electrodos punta-plano de polaridad negativa

Cuanto mayor es la tensión mayor es la frecuencia de los pulsos de corriente, lo cual es lógico ya que aumenta la energía en el entrehierro y permite una mayor ionización. También dependen del radio de la punta, de la longitud del entrehierro (a mayor longitud, menor frecuencia) y de la presión (a menor presión, menor frecuencia).

La Figura 16 [Kuffel00] muestra las tensiones de inicio de corona de diferentes tipos de descargas de cátodo en función de la separación de los electrodos.

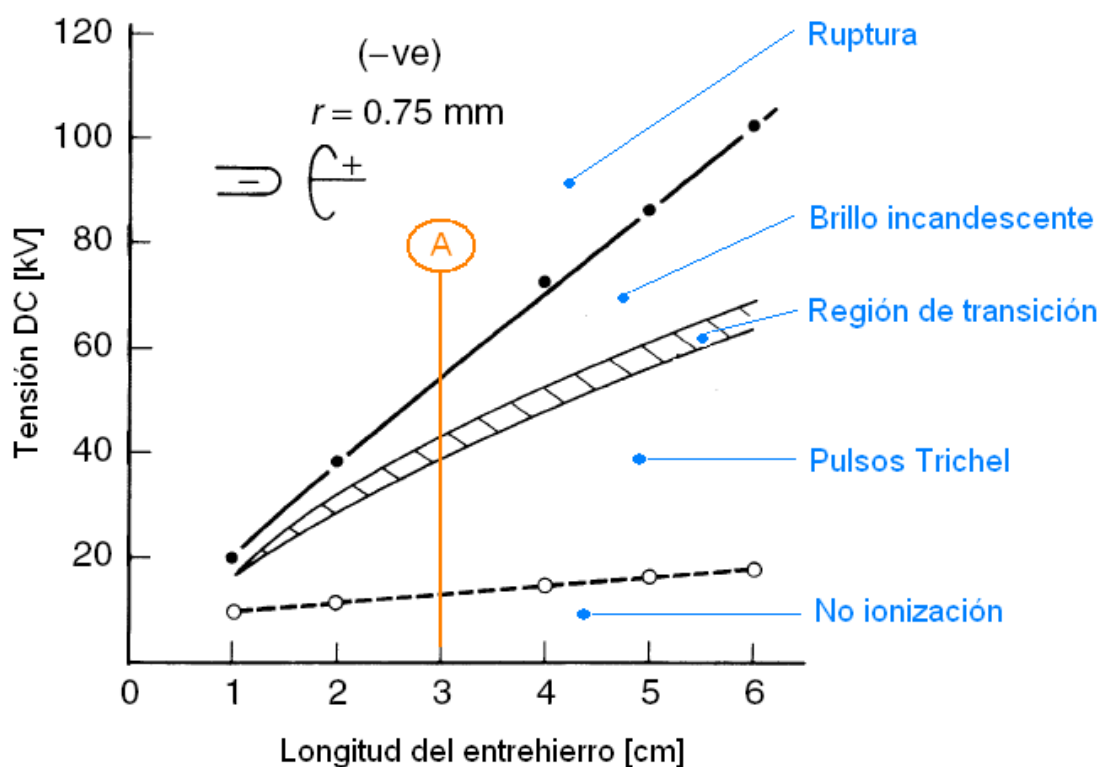


Figura 16. Descarga de cátodo con electrodos de punta-plano

Si vamos aumentando la tensión a lo largo de la línea (A) de la Figura 16, atravesaremos la región de no ionización hasta llegar a la línea discontinua, que marca el comienzo de los pulsos de Trichel. Esta línea discontinua es poco dependiente de la longitud del entrehierro. Hay un gran rango de tensión en el cual el modo de los pulsos no cambia (región de pulsos Trichel), pero si se aumenta la tensión por encima de esa región se alcanza la zona de brillo incandescente, en la cual la descarga eléctrica se auto sustenta y crea un brillo característico. Antes de llegar a esta región se atraviesa la región de transición, en la cual se pasa de los pulsos de Trichel al brillo incandescente (ver Figura 16). El comportamiento en esta región no está bien definido, así que se mantiene como una región de transición entre los pulsos Trichel y el brillo incandescente. Si continuamos aumentando la tensión llegaremos a la zona de ruptura, en la cual la corriente atraviesa por completo el aislante.

Cabe destacar que los valores de tensión a los cuales se produce la ruptura son considerablemente mayores para el caso de polaridad negativa que para la polaridad positiva, excepto para bajas presiones. Por lo tanto, si la tensión aplicada es alterna, la ruptura se producirá cuando ésta se encuentre en su semiciclo positivo.

3.2. DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN DIELECTRICOS SÓLIDOS Y GASEOSOS. CASO TÍPICO DE DESCARGA PARCIAL EN LOS HUECOS DEL AISLANTE.

La tensión de comienzo del efecto corona (COV) en sólidos es varias veces mayor que en gases. Es por este motivo por el cual las descargas parciales se suelen dar en primer lugar en el gas que rodea al aislante sólido o incluso en los huecos formados dentro del mismo durante el proceso de fabricación.

Se puede determinar la tensión a la cual se producirá la descarga eléctrica en gases mediante las curvas calculadas en función de la distancia entre los electrodos y la naturaleza de los mismos, para unas condiciones de entorno dadas (ver apartado 4.3). A continuación vamos a ver cómo se distribuye la tensión en el entrehierro, cuando el aislante está formado por combinación de sólido y gas.

Cuando la tensión recorre dos sistemas (dieléctricos) en serie, se reparte como muestra la *Ecuación (20)* [Dunbar72].

$$V = V_1 + V_2 \quad (20)$$

Donde V es la tensión a través de los dos dieléctricos, V_1 es la tensión a través del sólido y V_2 es la tensión a través del gas.

Ahora vamos a ver una serie de disposiciones típicas que se dan en los aislamientos eléctricos.

3.2.1. Disposición gas-sólido

En la Figura 17 [Dunbar72], se representa una disposición simple con un dieléctrico gaseoso junto a otro sólido. Esta disposición puede representar el caso en el cual se tiene un cable cubierto por un aislante sólido perfectamente homogéneo separado del potencial de tierra por un gas perfectamente homogéneo.

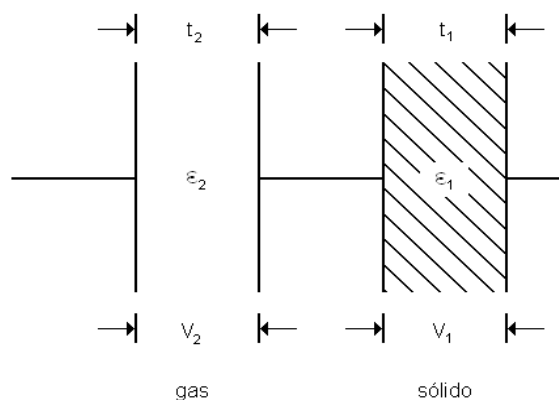


Figura 17. Dieléctrico gaseoso junto a dieléctrico sólido

Para esta figura la tensión en el gas responde a la *Ecuación (21)*.

$$V_2 = \left(\frac{V}{\frac{t_1}{t_2 \cdot \epsilon_1} + 1} \right) \quad (21)$$

Donde t_1 es el espesor del dieléctrico sólido (cm), t_2 es el espesor del dieléctrico gaseoso (cm) y ϵ_1 y ϵ_2 son constantes dieléctricas de sólido y gas. En la *Ecuación (21)* se ha tomado que $\epsilon_2 = 1$ por tomar como gas el aire. La tensión límite para que no se produzcan descargas con esta disposición durante la operación es:

$$V = V_{cs} \cdot \left(1 + \frac{t_1}{t_2 \cdot \epsilon_1} \right) \quad (22)$$

Siendo V_{cs} el COV. En esta ecuación también se ha supuesto que la constante dieléctrica del aire es uno.

3.2.2. Gas entre dos sólidos:

En la Figura 18 [Dunbar72], se representa un dieléctrico gaseoso entre dos sólidos. Esta disposición sirve para representar el caso típico de hueco relleno de gas en el aislante.

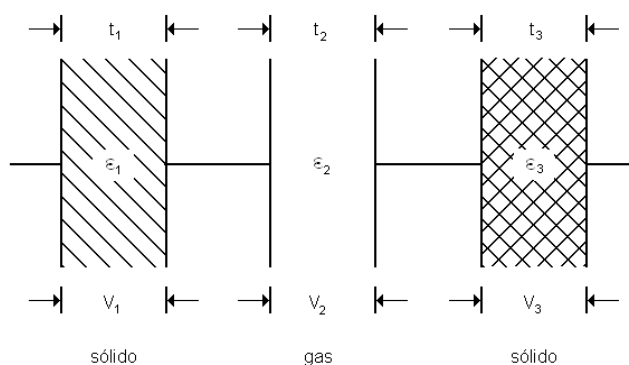


Figura 18. Dieléctrico gaseoso en medio de dos dieléctricos sólidos

Para este caso la tensión límite de operación libre de descargas queda como muestra la *Ecuación (23)*.

$$V = V_{cs} \cdot \left(\frac{t_1}{t_2 \cdot \epsilon_1} + 1 + \frac{t_3}{t_1 \cdot \epsilon_3} \right) \quad (23)$$

Representando el subíndice 3 al segundo dieléctrico sólido.

3.2.3. Sólido entre dos gases:

En la Figura 19 [Dunbar72], se representa el caso de un sólido entre dos gases, que se puede dar cuando partiendo de la situación del apartado 3.2.1, la unión del cable con el aislante sólido no es perfecta, si no que hay una holgura entre el conductor y el aislante sólido formando pequeñas cavidades rellenas de gas.

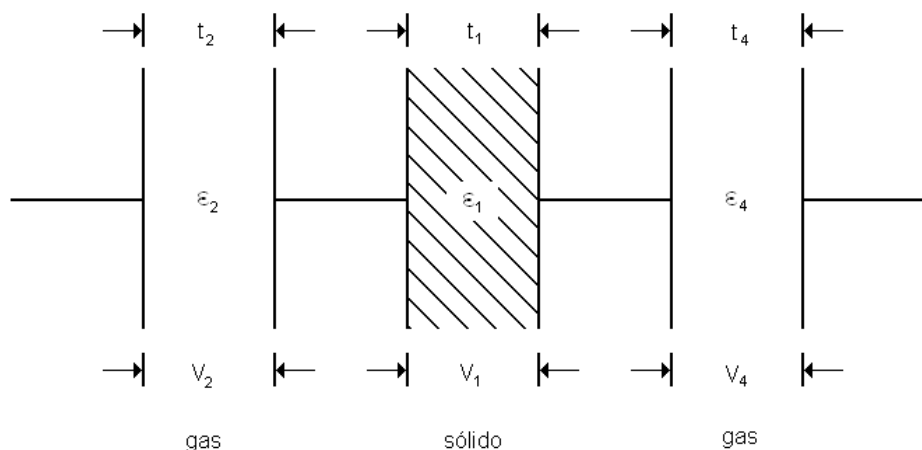


Figura 19. Dieléctrico sólido en medio de dos gaseosos

El resultado obtenido en esta ecuación será el mostrado en la *Ecuación (24)*.

$$V = V_{CS} \cdot \left(\frac{t_1}{t_4 \cdot \epsilon_1} - \frac{t_2}{t_4} + 1 \right) \quad (24)$$

Representando el subíndice 4 al segundo dieléctrico gaseoso.

3.2.4. Caso particular de huecos en los aislantes

En los huecos de los aislantes, que suelen estar rellenos de gas (véase el apartado 3.2.2) se pueden dar descargas parciales que van desgastando el aislante desde el interior. Los huecos suelen producirse en el proceso de fabricación. Gracias a técnicas de ultrasonidos es posible detectar huecos con un tamaño mínimo de $8\mu\text{m}$ [Cotton08]. En la Figura 20 [Cotton08] se ve el campo necesario para producir la ruptura del aire en los huecos del aislante, para huecos de diferentes tamaños en función del valor del producto de la presión por la longitud del entrehierro $p \cdot d$ (ver apartado 4.3). En este caso el hueco del aislante coincide con el entrehierro, por lo tanto, para cada tamaño de hueco la intensidad del campo de ruptura sólo depende de la presión.

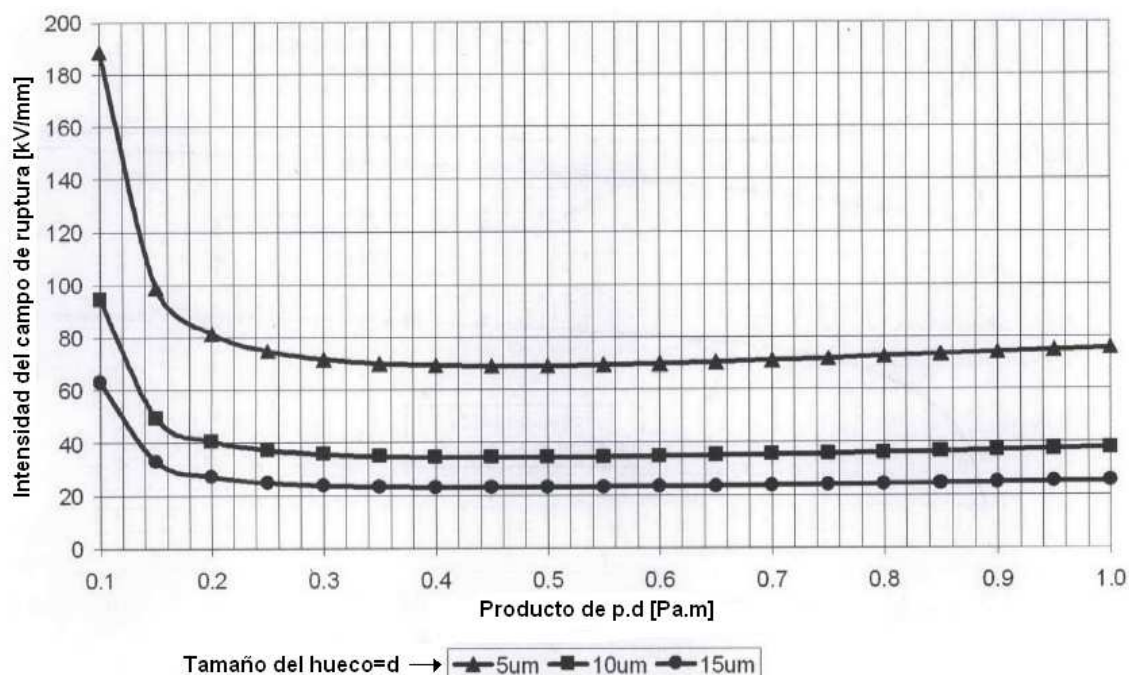


Figura 20. Intensidad de campo de ruptura en el hueco de un aislante sólido

Se aprecia en la figura que el valor más crítico (menor) de intensidad de campo eléctrico se obtiene para valores que rondan los $0.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}$. Además se demuestra que cuanto mayor sea el tamaño del hueco, menor es el campo eléctrico necesario para producir la descarga. Esto es debido a que cuanto mayor es el espacio relleno de gas, mayor será el camino libre que podrán recorrer los electrones, por lo que tendrán la posibilidad de adquirir más energía y facilitar entonces la ionización de los demás átomos. Esto es válido siempre y cuando nos movamos en el rango de valores de entrehierro de los huecos en los aislantes. En todos los casos hay un mínimo de tensión por debajo del cual no se produce la descarga en el hueco, por lo que conociendo el tamaño de los huecos creados en el aislante durante su fabricación, se puede diseñar el sistema eléctrico (limitando la intensidad de campo eléctrico que deberá soportar el aislante) de tal manera que no se produzcan descargas parciales.

Cabe destacar que debido a que la resistencia dieléctrica de los gases es menor que la de los sólidos, el hecho de que existan huecos dentro de los aislamientos debilita la protección del sistema, tanto más cuanto mayor sea el tamaño de los huecos.

3.3. CAMPO DE INICIO DE LA DESCARGA PARCIAL. LEY DE PEEK

La Ley de Peek relaciona el campo eléctrico necesario para que se produzca una descarga parcial en función de la naturaleza, tamaño y forma de los electrodos que participan en la descarga, así como de las condiciones del ambiente.

Una expresión adaptada al caso típico de electrodos con geometría de punta-plano, es la mostrada en la *Ecuación (25)* [Cotton07]. Dado que esta disposición crea campos eléctricos no uniformes, favorece la aparición de descargas eléctricas parciales.

$$E_{max} = 315 \cdot p + \frac{0.96 \cdot \sqrt{p}}{\sqrt{0.5 \cdot r}} \quad (25)$$

Donde E_{max} es el campo eléctrico máximo en [kV/cm], r es el radio del electrodo de punta en [cm] y p es la presión del aire aislante que separa los electrodos en [mm Hg].

Un ejemplo gráfico que muestra la tensión de inicio de descarga parcial en función de la longitud del entrehierro con esta disposición de electrodos de punta-plano y tomando como radio fijo del electrodo de punta 0.01 cm, para diferentes presiones se puede ver en la Figura 21 [Cotton07].

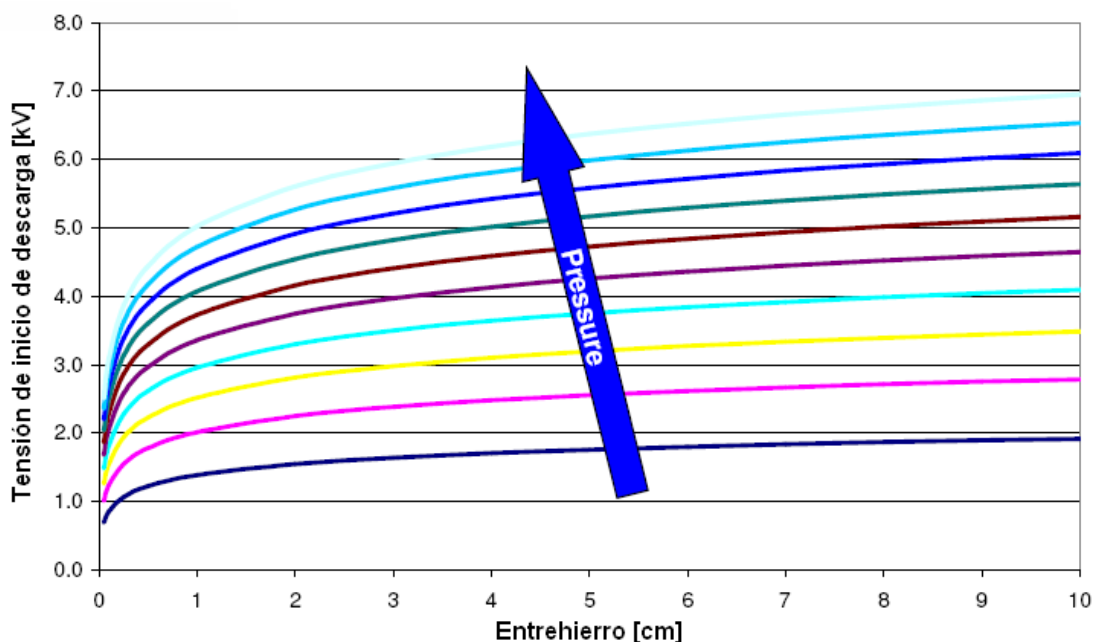


Figura 21. Tensión de inicio de descarga parcial en función de la longitud del entrehierro, para disposición de electrodos punta-plano con radio de punta fijo

De esta figura cabe destacar que las tensiones de inicio de descarga parcial calculados por la Ley de Peek para este tipo de electrodos (ver *Ecuación (25)*) son menores que los necesarios para conseguir la ruptura completa del aislante, ver capítulo 4. Además se aprecia que cuanto mayor es la presión del gas aislante mayor es la tensión necesaria para que se produzca la descarga. Esto es debido a que una mayor presión representa una mayor densidad en el gas y ello implica que el espacio intermolecular es menor. Al ser menor este espacio, la longitud media de los caminos libres recorridos por los electrones es pequeña y dificulta que éstos adquieran suficiente energía cinética para producir la ionización por choque con las partículas del gas, por lo que para

que se produzca la ionización que conlleve a la descarga se necesitará que el campo externo aplicado sea mayor, o lo que es lo mismo, que la tensión entre los electrodos sea mayor.

3.4. EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS DESCARGAS PARCIALES

Las descargas parciales se localizan en partes específicas dentro del sistema eléctrico y están limitadas en extensión, por lo que no causan la inmediata ruptura del aislante. Se producen en los gases y se pueden dar en los huecos de los sólidos o incluso en las burbujas que se pueden formar en los aislantes líquidos. Esto sucede debido a que la resistencia dieléctrica que presentan los gases como aislantes eléctricos es menor que la de los sólidos o líquidos.

Los efectos de las descargas parciales en los cables de alta tensión pueden ser muy perjudiciales para el sistema eléctrico. El efecto acumulativo de este tipo de descargas dentro de los aislantes sólidos, por culpa de los huecos dentro de los mismos, va creando la degradación interna del material y formando numerosos caminos en forma de árbol a través de los cuales se propaga la descarga.

Debido a la energía y características de este proceso se dan también una serie de reacciones químicas que alteran la naturaleza del aislante en las proximidades de la descarga, volviéndolo más vulnerable y disminuyendo así la fiabilidad y vida útil del cable. Parte de la energía que se forma en la descarga, además de la que se absorbe en la reacción química y la que se pierde por la formación de la chispa luminosa y el sonido, es calorífica. Este calor también degrada térmicamente el material del aislante, aunque su influencia no suele ser muy grande salvo que se trate de muy altas tensiones.

Como hemos visto, el efecto principal de las descargas parciales es el deterioro progresivo de los aislantes. Esto hace que disminuya considerablemente la vida útil de los cables, y por consiguiente que el sistema necesite de mayor mantenimiento y reparaciones. En el peor de los casos las descargas parciales pueden dar lugar a la ruptura total del aislante y a la aparición de una descarga disruptiva, ver capítulo 4.

Además de este efecto también producen interferencias en los sistemas de comunicaciones y el mal funcionamiento de algunos sistemas. Estas descargas también ocasionan pérdidas de carga.

Cabe destacar el riesgo de que se produzcan las descargas en ambientes propensos a la inflamación, ya que la energía calorífica y la chispa que formada en estos sucesos puede ocasionar fuego, si se da en este tipo de ambientes.

Las descargas parciales se pueden asumir siempre y cuando sus efectos no disminuyan la funcionalidad, seguridad y fiabilidad del avión durante su periodo de vida útil. En cualquier caso, son un efecto no deseado que se trata de evitar.

3.5. FACTORES INFLUYENTES

Factores como la temperatura, la radiación de partículas cargadas, las radiaciones ultravioletas, tipo de material y forma de los electrodos, material de los aislantes, partículas de polvo, gases del exterior, humedad, contaminantes, etc. influyen en el comportamiento de las descargas eléctricas y deterioro de los materiales. En este tipo de descargas cabe destacar el efecto de los factores explicados a continuación:

3.5.1. Temperatura

Los efectos de la temperatura sobre la ruptura de los gases están relacionados en una primera fase con la variación de la densidad del gas. Un aumento de la temperatura conlleva una disminución de la densidad y, por tanto, un aumento de la longitud de los caminos libres de los electrones. Por lo tanto, a mayor temperatura mayor facilidad de ionización (los electrones adquieren la energía necesaria sin necesidad de campos muy fuertes) y mayor probabilidad de descarga.

Al llegar a temperaturas superiores a 1400 °K el efecto de la temperatura sobre la densidad del gas pierde relevancia, ya que comienza a ser determinante en la ionización el proceso de ionización térmica.

Podemos corregir el efecto de la temperatura variando la presión.

Este factor es común con las descargas disruptivas, que se exponen en el capítulo 4.

3.5.2. Radiaciones

3.5.2.1. *Radiaciones gamma*

Cuando los isótopos de las radiaciones gamma se usan para ionizar el material, el efecto corona se ve afectado de tres formas:

- La tensión de comienzo del efecto corona se ve reducida ligeramente.
- Aumenta la intensidad y la intermitencia de las descargas.
- Pueden alterarse las propiedades mecánicas y/o eléctricas de los aislantes, pudiendo volver el material menos resistente al efecto corona.

3.5.2.2. *Radiaciones ultravioletas e infrarrojas*

Las radiaciones ultravioletas e infrarrojas degradan los materiales.

3.5.2.3. Radiación de las partículas cargadas

La radiación de las partículas cargadas, sean del tipo que sean, tienden a reducir el COV. Por ejemplo [Dunbar72], el COV de unos electrodos cuando el flujo de partículas cargadas es de 10^{10} electrones/cm³ es de 325V, mientras que cuando el flujo es de 10^{14} y 10^{15} pasa a ser de 175V y 125V respectivamente. Por lo tanto, si los equipos van a ver expuestos a altas dosis de estas partículas hay que emplear protecciones apropiadas.

3.5.3. Partículas contaminantes

Las partículas contaminantes son peligrosas porque favorecen la acumulación de campo eléctrico en un punto. Como regla general se puede asumir que a mayor cantidad de partículas contaminantes, más fácil es que se produzca la descarga parcial.

Este factor también es común con las descargas disruptivas, que se exponen en el capítulo 4.

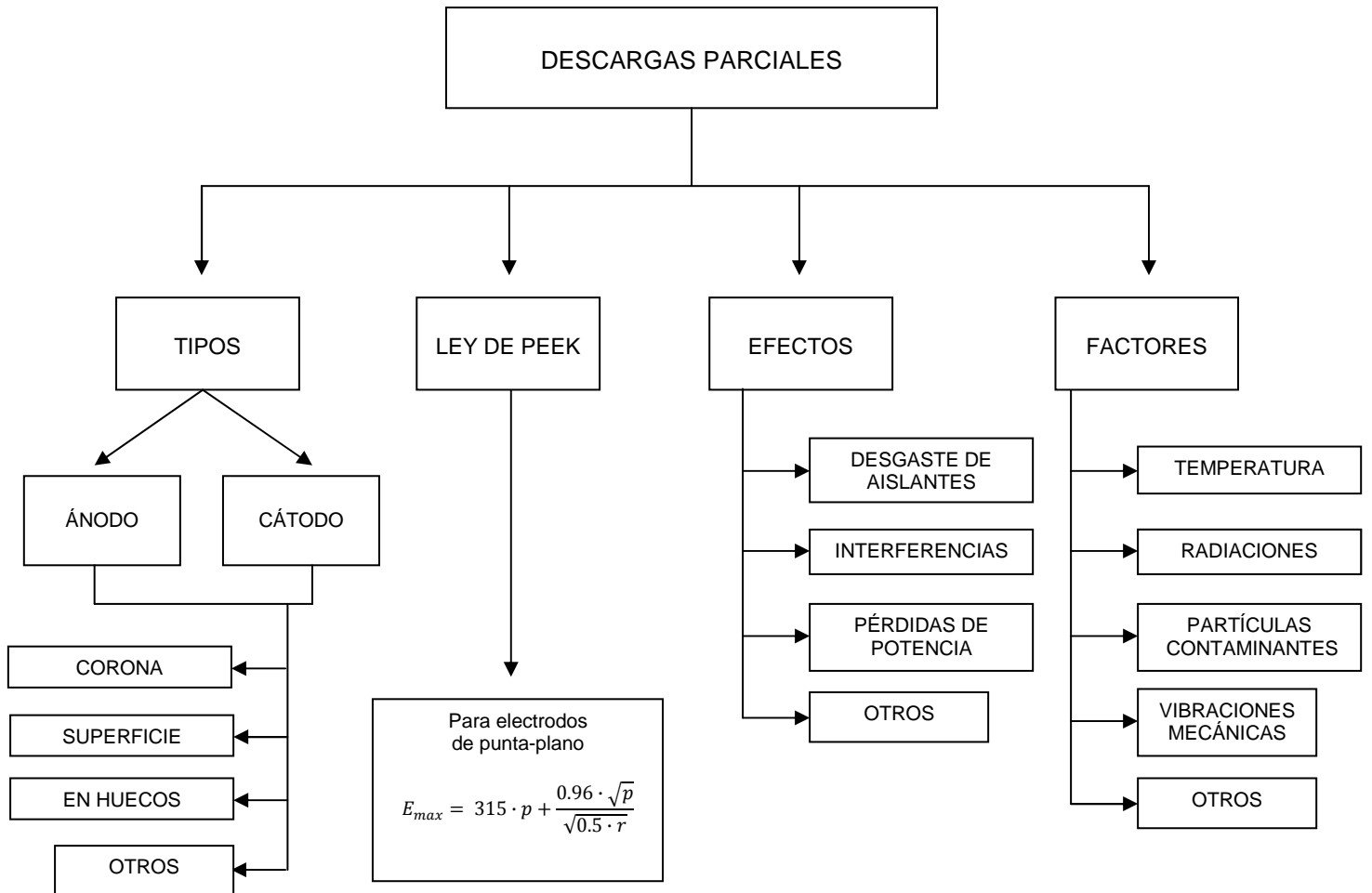
3.5.4. Vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas son muy comunes en los aviones y deben ser tenidas en cuenta, ya que hacen que los gap que separan los sistemas de cableado varíen. También pueden provocar la conexión-desconexión de algún dispositivo, dando lugar a transitorios y descargas no deseadas.

Para generalizar, se puede asumir que las vibraciones mecánicas disminuyen la resistencia de los aislantes y favorecen la aparición de descargas.

Este factor también es común con las descargas disruptivas, que se exponen en el capítulo 4.

CAPÍTULO 3. DESCARGAS PARCIALES



CAPÍTULO IV: DESCARGAS DISRUPTIVAS

4. DESCARGAS DISRUPTIVAS

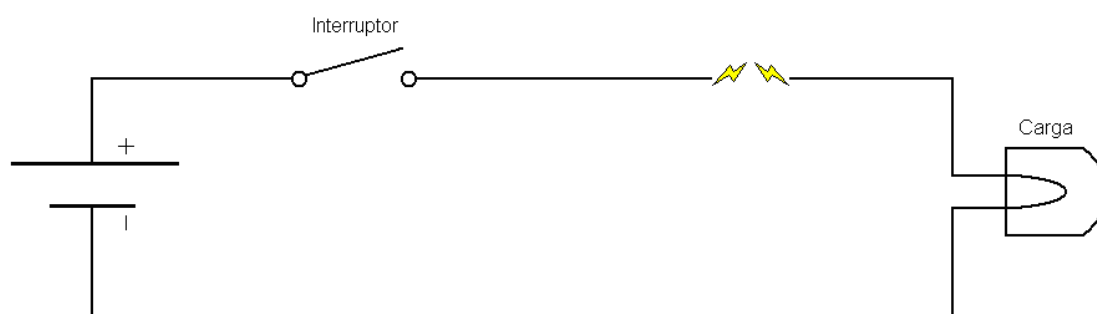
Las descargas disruptivas son aquellas en las que la corriente consigue atravesar por completo el aislante que separa a dos conductores de diferente potencial. En este tipo de descarga eléctrica, el circuito eléctrico formado se cierra y se produce la circulación de la corriente eléctrica. El camino que recorre la corriente para atravesar el aislante se crea al ionizarse el aislante que separa los conductores, siguiendo los mecanismos de las descargas eléctricas explicados en el capítulo 2. La forma más común de denominar a las descargas disruptivas es “arco eléctrico”.

4.1. ARCO ELÉCTRICO

Como ya hemos mencionado anteriormente un arco eléctrico es el flujo de corriente que atraviesa el aislante presente entre dos conductores metálicos a diferente tensión. Hay dos tipos de arcos diferentes, los arcos serie y arcos paralelos. En ambos tipos las consecuencias del arco pueden llegar a provocar explosiones o fuego. A continuación se describen las características que diferencian a cada tipo de arco.

4.1.1. Arco serie

El arco serie se da cuando el aislante que atraviesa el arco está en serie con la carga. En este tipo de arco la corriente del mismo no puede ser mayor que la que demanda la carga. En la Figura 22 se muestra una representación esquemática de arco serie.



Arco eléctrico serie

Figura 22. Esquema de circuito con arco serie

Desafortunadamente algunas cargas utilizan este tipo de arcos como parte de su funcionamiento normal, por lo que la detección se vuelve harto complicada. Un claro ejemplo es la chispa que produce un motor de coche al arrancar. Otro caso se da en el encendido de algunas lámparas, como en el caso de los

fluorescentes, donde también es muy complicado diferenciar la operación normal de un arco eléctrico en serie.

4.1.2. Arco paralelo

El arco paralelo se da cuando la corriente del mismo fluye entre dos conductores diferentes próximos entre sí o entre un conductor y tierra, sin pasar por la carga. En este caso sólo la capacidad de la fuente de alimentación y la resistencia del cable limitan el pico de corriente producido. En la Figura 23 se muestra la representación esquemática de este tipo de arco.

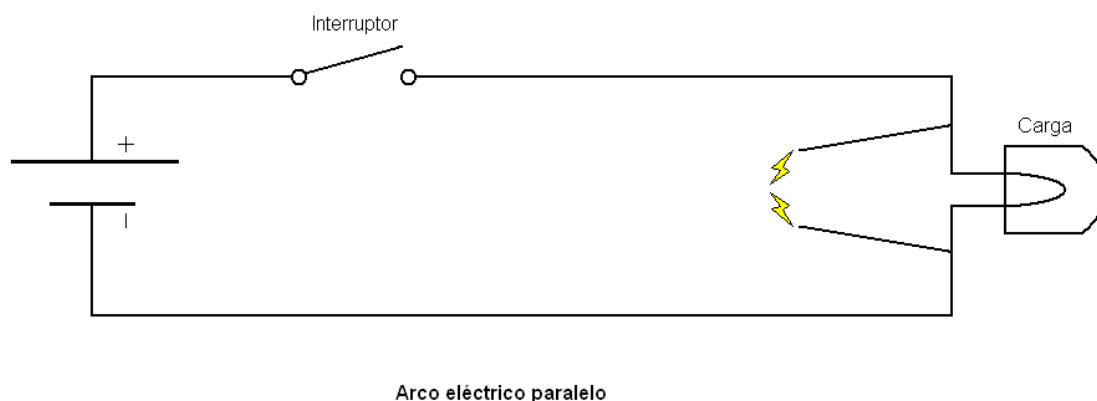


Figura 23. Esquema de circuito con arco paralelo

Los arcos paralelos se suelen dar cuando el aislante de un cable energizado se ha perdido o deteriorado y el conductor se aproxima lo suficiente a tierra (u otro cable con diferente potencial) como para que se produzca la descarga.

4.1.3. Características generales de los arcos

Los resultados empíricos [Schoepf00] muestran que la tensión de un arco eléctrico no crece proporcionalmente a la corriente (como era de esperar por la Ley de Ohm), si no que decrece progresivamente. En estos estudios se ha descubierto que la tensión decrece hasta un mínimo, que se alcanza para una corriente de unos 50 A. Cuando la corriente sobrepasa los 80 A la tensión vuelve a crecer. Por otra parte, a medida que la corriente por el arco es menor, la tensión crece. Esto sucede hasta que se alcanza un mínimo de corriente I_m , que depende de cada tipo de electrodo.

La tensión del arco también es mayor cuanto mayor es la longitud del aislante que atraviesa el arco (entrehierro). Esta relación es lineal para longitudes de entrehierro mayores a 1 cm.

En la Figura 24 [Schoepf00] se muestra una familia de curvas de tensión-corriente de arco para diferentes longitudes de entrehierro. En esta figura no se aprecia el crecimiento de la tensión a partir de los 80 A, ya que se corta en el punto en el cual la tensión ronda su valor mínimo (50 A).

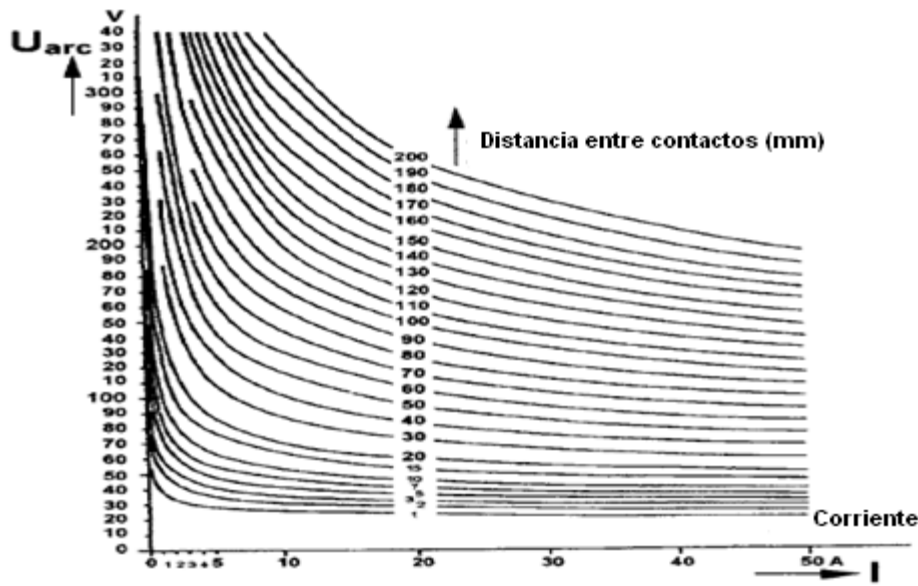


Figura 24. Curvas características de tensión-corriente de arco eléctrico

Estas curvas se usan frecuentemente para calcular la tensión y corriente de un arco para una determinada longitud, en cualquier circuito eléctrico, y así poder conocer la longitud crítica del arco. Esta longitud representa el punto a partir del cual, si aumentamos la distancia entre los conductores, el arco se extingue.

La Figura 25, permite calcular dicha longitud teniendo en cuenta que U_0 es la tensión de alimentación, o tensión de la fuente, y que I_0 es la corriente que circula cuando el interruptor está cerrado (no hay arco eléctrico).

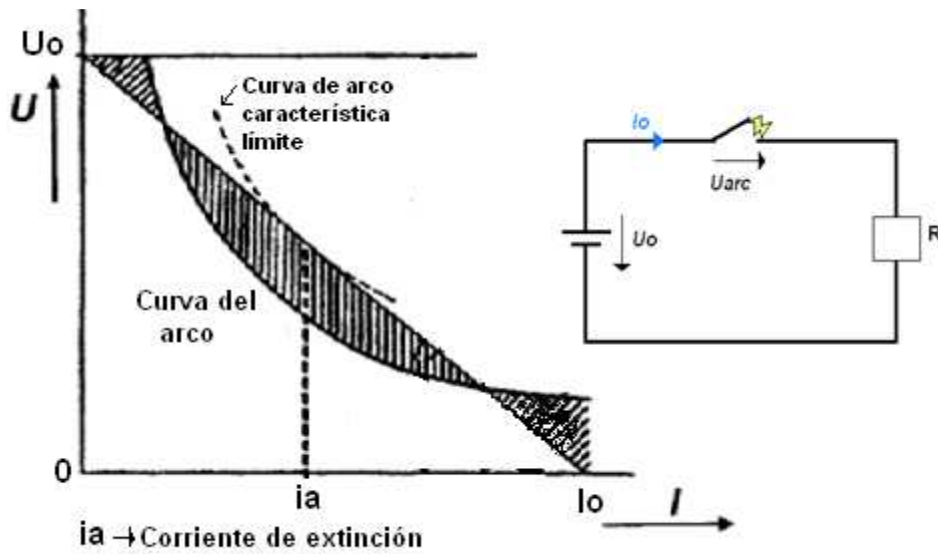


Figura 25. Curva característica crítica de arco eléctrico para un circuito dado

Como hemos mencionado antes esta figura muestra cómo calcular el valor de la longitud crítica del arco eléctrico para un circuito dado. Gracias al conocimiento de los parámetros del circuito, que son el valor de la tensión que suministra la fuente de alimentación U_0 y la resistencia R (por lo que también se puede suponer conocido el valor de la corriente que circula por el circuito cuando el interruptor está cerrado I_0) podemos crear esta figura y empleando

también las curvas características de la Figura 24, podemos determinar la longitud crítica del arco para una corriente dada.

Si nos fijamos bien en la Figura 25 la recta que une U_0 e I_0 va a ser la referencia que nos indicará si el arco eléctrico se va a mantener o se va a extinguir. Si la curva característica del arco se encuentra por encima de esta recta no habrá arco eléctrico (o se extinguirá), dado que la energía del arco está limitada por los valores del circuito. En esa región el arco necesitaría más energía para mantenerse de la que le puede dar el circuito. Si observamos la curva secante a la recta de referencia (dibujada con línea continua) el área sombreada por debajo de la recta de referencia marca el rango de valores de tensión y corriente de arco gracias a los cuales éste se podría mantener, mientras que el área que se encuentra por encima de la recta nos indica el rango de valores para los cuales se extinguiría el arco. Si ahora vemos el caso límite, que viene representado por la curva característica dibujada con línea de puntos, podemos obtener el valor de la longitud crítica del arco eléctrico para ese circuito y con esos electrodos (tipo de interruptor). El punto de tangencia representa el único valor de tensión y corriente (i_a) para el cual se puede mantener el arco.

Hay que recordar que cada curva característica empleada representa una longitud de entrehierro particular, por lo que elegir una curva u otra no es más que variar dicha longitud. Es por tanto la elección de la curva tangente a la recta de referencia la que nos indica cuál es la longitud crítica del arco eléctrico, ya que si tomamos otra curva con mayor entrehierro no cortará a la recta de referencia en ningún punto para ningún valor de corriente y tensión.

Que la curva característica no corte en ningún punto a la línea de referencia del circuito no quiere decir necesariamente que no se pueda producir un arco eléctrico, ya que si existen bobinas en el circuito pueden forzar dicho arco, debido a que al interrumpir la corriente, las bobinas producen un sobretensión que fácilmente puede sobrepasar el mínimo tensión de arco.

4.2. TIPOS DE RUPTURA DEL AISLANTE QUE SEPARA LOS CONDUCTORES

Los tipos de ruptura, así como sus características particulares se van a explicar a continuación en función del tipo de aislante que separa los conductores entre los cuales se produce el arco eléctrico.

4.2.1. Ruptura en aislantes gaseosos

Este tipo de aislantes está presente en casi todos los sistemas eléctricos, ya sea como aislante propiamente diseñado e instalado para tal efecto, con lo cual suele venir acompañado de un recipiente de contención que mantenga la presión del gas dentro de los límites correctos y que evite las fugas del mismo al exterior, o por que forme parte del espacio de separación entre conductores previamente aislados (como ejemplo se podría tomar el caso del aire entre dos cables con aislante sólido propio). Aunque hay varios aislantes gaseosos con buenas propiedades dieléctricas su empleo en sistemas aeronáuticos no está

muy extendido debido a que el recinto de contención del gas lo convierte en un aislante muy pesado y a que el riesgo de fuga lo convierte en un tipo de aislante poco fiable. En aplicaciones terrestres está muy extendido el uso del SF₆ por su gran resistencia eléctrica ante arcos.

Aunque no sea un método de aislamiento propio empleado el estudio de las descargas eléctricas en los gases es muy importante dado que la mayor parte de los arcos se producen a través de este tipo de aislantes, al deteriorarse el aislante sólido de los conductores.

4.2.1.1. Ruptura en campos uniformes

La resistencia del aislante a ser atravesado por la corriente eléctrica de un arco se suele expresar en términos de la tensión o campo eléctrico que hay que aplicar a los conductores para que se produzca la ionización y se de la descarga. Como veremos en el apartado 4.3, la tensión de ruptura del aislante gaseoso se calcula en función del producto de la presión del gas por la distancia entre los conductores ($p \cdot d$). En la Figura 26 [Kuffel00] se puede apreciar la relación existente entre la intensidad del campo eléctrico de ruptura, E_b (partida por la presión) y el producto $p \cdot d$:

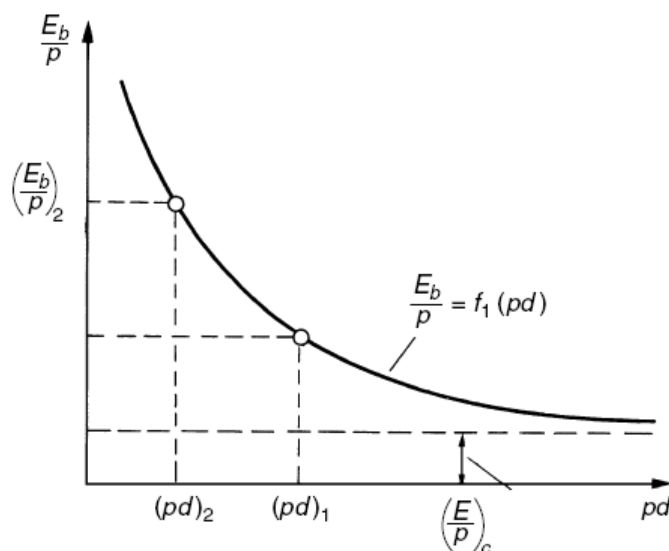


Figura 26. Relación entre la intensidad del campo eléctrico y el producto $p \cdot d$

Donde el E_b/p se mide en $[\frac{kV}{cm \cdot bar}]$ y el producto $p \cdot d$ en $[bar \cdot cm]$. En la figura

se muestra que a medida que aumentamos el valor del producto $p \cdot d$ la intensidad del campo necesaria para que se dé la descarga es menor. También cabe destacar que existe un valor mínimo de campo eléctrico $(\frac{E}{p})_c$ de referencia. Esto quiere decir que, para cada gas, si el campo eléctrico es menor de este valor de referencia, no se producirá la descarga para ningún valor de $p \cdot d$. Esto es debido a que para esos valores la energía aportada a los electrones no es suficiente para causar la ionización de los átomos del gas, por lo que si conseguimos mantener el campo eléctrico controlado dentro de unos

ciertos valores podremos diseñar los aislantes eléctricos de tal forma que no se produzcan arcos eléctricos.

Como se verá en el apartado 4.3, la relación mostrada en la Figura 26 sólo es válida para un cierto rango de valores del producto $p \cdot d$.

Si el gas estudiado es el aire, podemos emplear la *Ecuación (26)* de Schumann [Kuffel00] para calcular la tensión o la intensidad del campo eléctrico para valores de presión y temperatura estándares y longitudes de entrehierro desde 1 mm hasta 100 mm. Esta ecuación se ajusta en gran medida a los resultados experimentales.

$$\frac{V_b}{(pd)} = \frac{E_b}{p} = \frac{6.72}{\sqrt{pd}} + 24.36 \left[\frac{kV}{cm \text{ bar}} \right] \quad (26)$$

Se van a estudiar con mayor detalle los límites de tensión de descarga en gases en el apartado 4.3 (Ley de Paschen).

4.2.2. Ruptura en sólidos

Los aislantes sólidos están totalmente integrados en los sistemas de protección de alta tensión. Este tipo de aislantes dan un soporte estructural al conductor además de aislarlo de los demás conductores.

Normalmente los sistemas aislantes consisten en una combinación de elementos sólidos combinados con otros líquidos y/o gaseosos.

En los gases el mecanismo de ruptura dieléctrica está aceptablemente comprendido, no como en el caso de los sólidos. Hay muchos factores que influyen en la tensión de ruptura de los dieléctricos sólidos, tales como la temperatura, la presión, la humedad, las impurezas...

Podemos ver cómo afectan algunos de estos factores a la capacidad aislante del teflón en la Figura 27 [Dunbar72]. Es importante recordar para esta figura que 1 mil = 0.0254 mm.

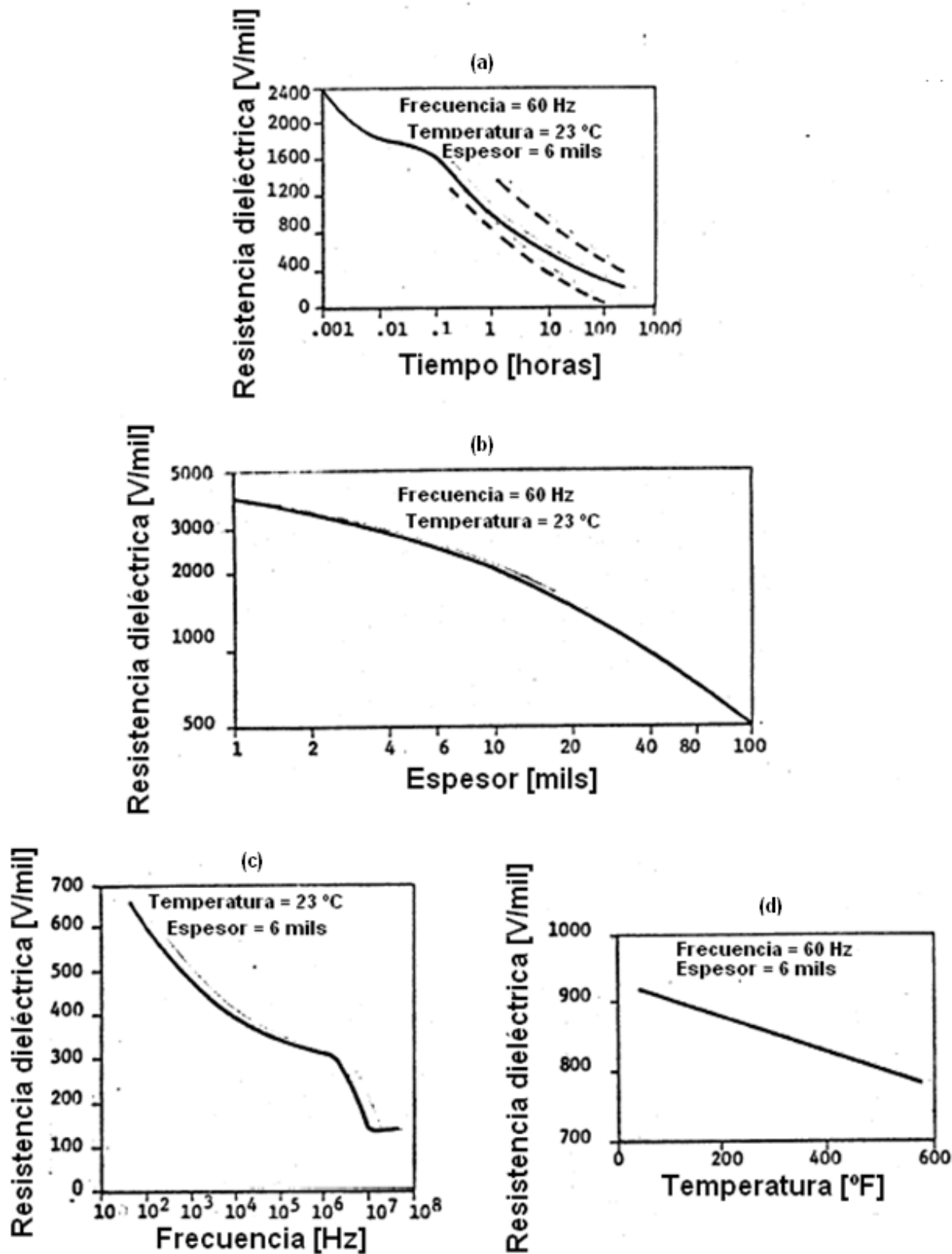


Figura 27. Efecto de algunos factores sobre la resistencia dieléctrica del teflón

En la Figura 28 [Kuffel00] se representan los tipos de mecanismos de ruptura en sólidos, en función del tiempo durante el que se aplica el campo eléctrico.

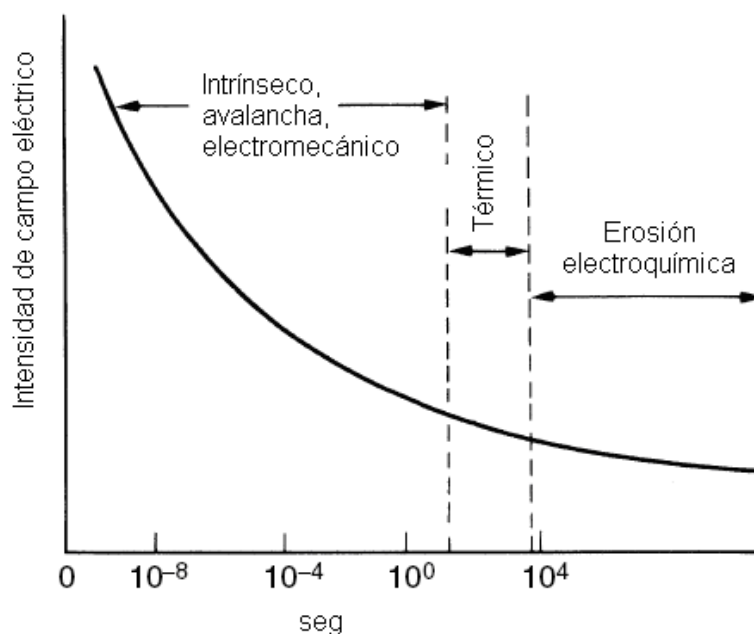


Figura 28. Mecanismos de ruptura en sólidos

4.2.2.1. Ruptura intrínseca

La resistencia intrínseca es una propiedad que depende únicamente del material aislante y de la temperatura. Se ha postulado [Kuffel00] que la ruptura intrínseca tiene naturaleza electrónica debido a que ocurre en tiempos del orden de 10^{-8} segundos. La intensidad de campo eléctrico necesaria para que se produzca dicha ruptura debe ser mayor a 10^6 V/cm. Todavía no se han desarrollado métodos fiables para determinar el valor de la resistencia intrínseca a la ruptura.

Fröhlich [Kuffel00] explica este proceso asumiendo que los electrones absorben energía del campo eléctrico aumentando su temperatura, a la vez que la ceden a la estructura del sólido. Se está dando pues en todo momento una transferencia térmica entre los electrones y el sólido. Cuando el campo es grande, la energía que ganan los electrones es mayor que la que ceden, con lo que llegan a un punto en el que pasan a su banda de conducción y se produce la corriente. Este intercambio de energía viene representado en la *Ecuación (27)* [Kuffel00].

$$A(E, T, \alpha) = B(T, \alpha) \quad (27)$$

Donde A es la energía absorbida, B la cedida, E es la intensidad del campo eléctrico, T es la temperatura y α representa todos los demás factores de los que depende la transferencia. Esta relación se cumple para valores de campo

eléctricas menores a un valor crítico E_c , que es considerada como la intensidad de campo crítica intrínseca.

4.2.2.2. Ruptura por avalancha

Se entiende por ruptura por avalancha en sólidos la que se produce por una única avalancha electrónica. Cuando un electrón pasa a la banda de conducción y gracias a la influencia del campo eléctrico adquiere más energía que la de ionización de las celdas del sólido, es capaz de desprender a otros electrones al colisionar con dichas celdas. Si este proceso se repite se puede llegar a formar una avalancha electrónica similar a la que se formaba en los gases. Según Seitz [Kuffel00], si el tamaño de la avalancha supera un tamaño crítico se producirá la ruptura. El concepto es similar a la teoría de canales desarrollada por Raether, Meek y Loeb en el apartado 2.3.4.

4.2.2.3. Ruptura electromecánica

La ruptura electromecánica es la producida por las fuerzas electrostáticas de compresión que se forman al aplicar una diferencia de potencial entre las superficies de un sólido. La presión ejercida cuando el campo eléctrico alcanza los 10^6 V/cm es del orden de varios kN/m².

Según los estudios de Stark y Garton [Kuffel00] las fuerzas de compresión electrostáticas y mecánicas están en equilibrio cuando:

$$\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \frac{V^2}{2 \cdot d^2} = Y \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d}\right) \quad (28)$$

o

$$V^2 = d^2 \cdot \frac{2 \cdot Y}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \ln\left(\frac{d_0}{d}\right) \quad (29)$$

Siendo ε_0 y ε_r las permitividades del vacío y relativa del dieléctrico respectivamente, d_0 el espesor inicial del material, Y el módulo de Young, V la tensión aplicada y d [m] el espesor hasta el que se reduce.

La Ecuación (29) [Kuffel00] tiene un máximo en $d/d_0 = 0.6$, por lo que ningún valor de V puede obtener valores menores de $d = 0.6 \cdot d_0$. Si la tensión que se aplica es mayor a la mencionada, el espesor se vuelve inestable, se colapsa y se rompe.

4.2.2.4. Ruptura térmica

Siempre que se le aplica una diferencia de potencial a un dieléctrico éste se calienta, esto es debido tanto a la polarización del mismo como a la conducción de la corriente eléctrica a través de él. En general, la conductividad aumenta con la temperatura. Cuando el calentamiento es superior al enfriamiento se llega a una inestabilidad térmica que da lugar a la ruptura térmica del aislante. Esta situación viene representada gráficamente en la Figura 29 [Kuffel00].

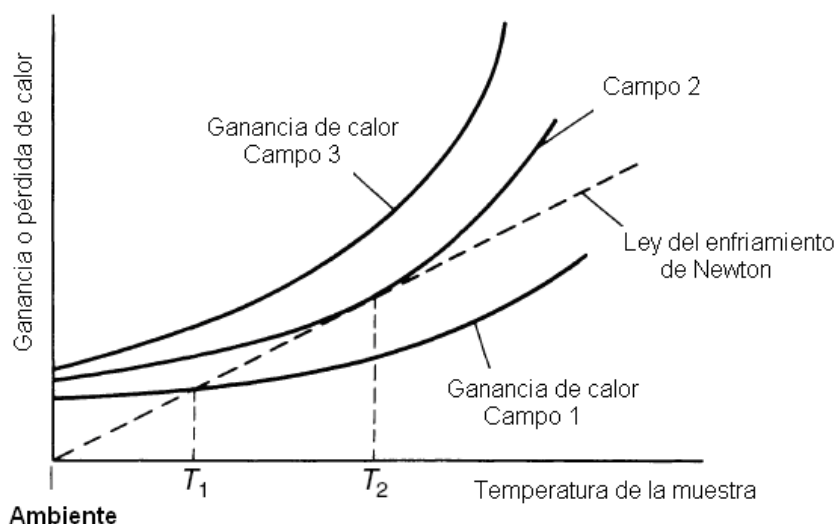


Figura 29. Análisis de la estabilidad en función del campo aplicado

La línea discontinua representa el enfriamiento y las líneas continuas representan el calentamiento bajo diferentes campos. El campo 1 está en equilibrio para una temperatura T_1 , el campo 2 experimenta un equilibrio inestable a la temperatura T_2 pero el campo 3 no alcanza el equilibrio en ningún momento y el aislante incrementa su temperatura hasta romperse. Siempre que la curva de ganancia de calor se encuentre por encima de la de enfriamiento significará que la energía que absorben los electrones del campo eléctrico es mayor que la que ceden a las celdas del sólido, por lo que son capaces de liberar a otros electrones al impactar con las celdas del sólido y provocar la ruptura térmica del aislante.

La expresión de la tensión crítica por ruptura térmica viene representada por la Ecuación (30) [Kuffel00].

$$V_c^2 = 8 \frac{K}{\sigma_0} \int_{T_0}^{T_c} \exp\left[\frac{u}{kT}\right] dT \quad (30)$$

Donde T_c es la temperatura crítica a la cual se descomponen los materiales, K es la conductividad térmica, u es una constante empírica y σ_0 es la conductividad eléctrica a la temperatura ambiente T_c . La tensión crítica es

independiente del espesor, salvo para espesores muy finos, donde es proporcional a la raíz cuadrada del mismo.

En la Tabla 4 [Kuffel00] se muestran algunas tensiones de ruptura térmica tanto para tensiones continuas como alternas.

Tabla 4. Tensiones de ruptura térmica a 20°C

<i>Material</i>		<i>Thermal voltage in MV/cm</i>	
		<i>d.c.</i>	<i>a.c.</i>
Crystals: Rock salts	Mica muscovite	24	7–18
		38	1.4
Quartz:	Perpendicular to axis	12 000	–
	Parallel to axis	66	–
	Impure	–	2.2
Ceramics:	H.V. steatite	–	9.8
	L.F. steatite	–	1.5
	High-grade porcelain	–	2.8
Organic materials:	Capacitor paper	–	3.4–4
	Ebonite	–	1.45–2.75
	Polythene	–	3.5
	Polystyrene	–	5
	Polystyrene at 1 MHz	–	0.05
	Acrylic resins		0.3–1.0

4.2.2.5. Ruptura por erosión

Se entiende por este tipo de ruptura la que se produce en los sólidos por el desgaste de los mismos a lo largo de su uso. Suele estar propiciada por las descargas parciales que se producen en el seno de este tipo de aislantes.

En la práctica los dieléctricos tienen pequeñas cavidades o huecos que generalmente se rellenan con gases de menor resistencia dieléctrica que el propio aislante sólido. Es por esto por lo que al aplicar una tensión segura para el dieléctrico sólido, se producen descargas parciales en los huecos que van deteriorando el material. El esquema mostrado en la Figura 30 [Kuffel00] es una representación eléctrica de esta situación.

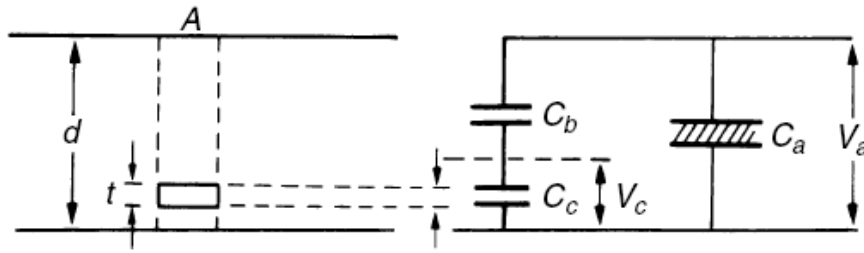


Figura 30. Esquema eléctrico de la distribución de tensiones en un aislante sólido con un hueco en su interior

Siendo

$$C_b = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d - t} \quad (31)$$

$$C_c = \frac{\varepsilon_0 \cdot A}{t} \quad (32)$$

C_b es la resistencia dieléctrica del aislante sólido en serie con el hueco, C_c es la del hueco y C_a es la del resto del dieléctrico. En este caso la cavidad tiene forma de disco de diámetro A y espesor t , despreciable comparado con el espesor del aislante sólido d . Las permitividades relativa y en vacío son respectivamente ε_r y ε_0 .

La tensión a través de la cavidad se muestra en la Ecuación (33) [Kuffel00].

$$V_c = \frac{C_b}{C_c + C_b} \cdot V_a = \frac{V_a}{1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \left(\frac{d}{t} - 1\right)} \quad (33)$$

La tensión que, aplicada al aislante sólido, provoca la descarga dentro del hueco del mismo es:

$$V_{ai} = E_{cb} \cdot t \cdot \left[1 + \frac{1}{\varepsilon_r} \cdot \left(\frac{d}{t} - 1\right)\right] \quad (34)$$

Donde V_{ai} es la tensión aplicada al sólido y E_{cb} es la intensidad de campo eléctrico a través del hueco que provoca la descarga en el gas.

En la Figura 31 [Kuffel00] se muestra una secuencia de descargas para corriente alterna.

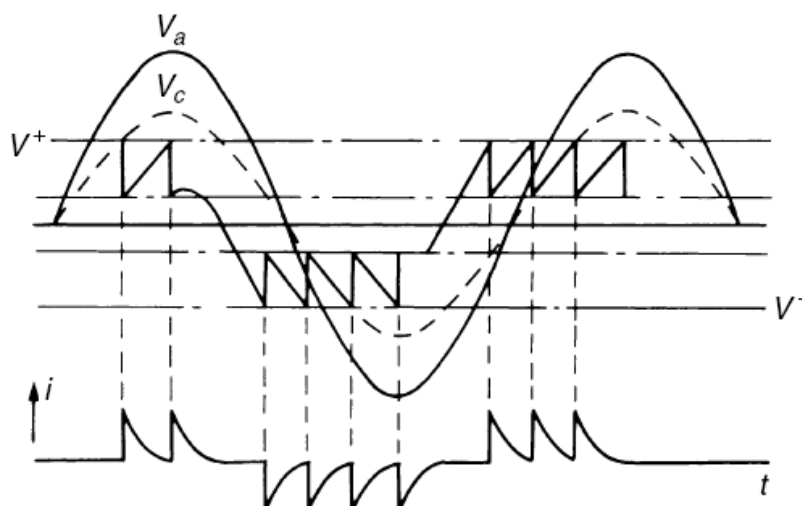


Figura 31. Secuencia de descargas en el hueco del aislante bajo tensiones alternas

La curva de puntos representa cualitativamente la tensión que habría en la cavidad si no se produjese la ruptura. Cuando V_c alcanza el valor V^+ la descarga se produce en el hueco del aislante, la tensión V_c se colapsa y la descarga se extingue. La tensión a través de la cavidad vuelve a crecer hasta que se alcanza nuevamente V^+ y se produce otra descarga. Estas descargas tienen lugar en la parte creciente del semiciclo alterno. El proceso es similar cuando se está en el semiciclo de tensiones negativas

Cada descarga dentro de la cavidad crea un ánodo y un cátodo en las superficies interiores, que sufren un gran aumento térmico y deterioro. También se produce degradación química. Este deterioro del dieléctrico disminuye su resistencia o tensión de ruptura.

Cuando la descarga se produce en la superficie del aislante sólido suele ocupar una gran superficie del mismo. Si la descarga consigue deteriorar el aislante y disminuir su resistencia, penetra en el mismo y se va expandiendo con un crecimiento tipo árbol, como el mostrado en la Figura 32 [Kuffel00].

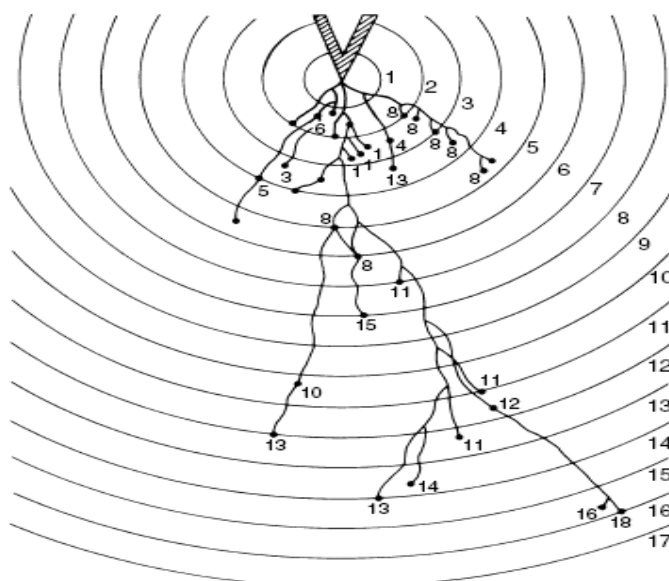


Figura 32. Esquema del desarrollo de tipo árbol de una descarga a través de un aislante sólido

Debido a las imperfecciones en la fabricación o a los malos diseños, la resistencia dieléctrica del aislante disminuye con el tiempo de exposición a la tensión.

La Figura 33 [Kuffel00] muestra la relación entre la intensidad de campo eléctrico de ruptura y el tiempo de uso en cables de polietileno con diferentes fabricantes.

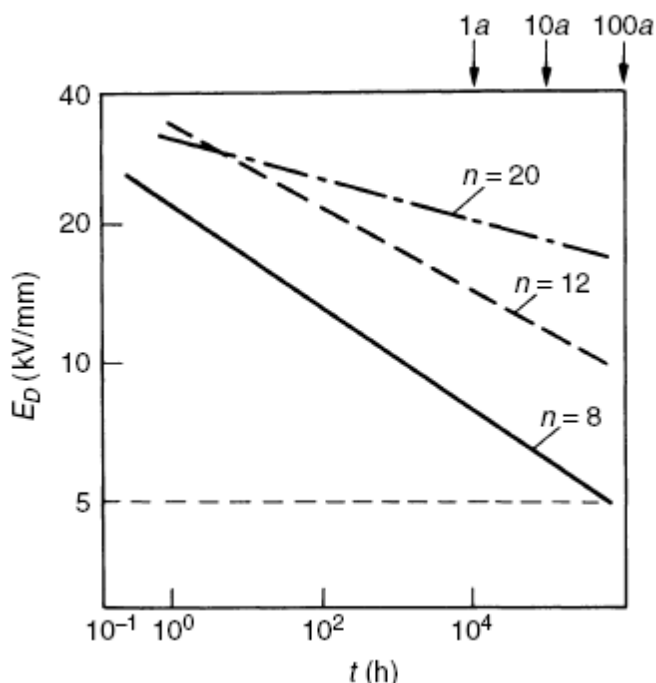


Figura 33. Relación entre la intensidad de campo eléctrico de ruptura y el tiempo de uso en cables de polietileno con diferentes fabricantes

En este caso el valor del campo eléctrico de ruptura E_D da una idea de cómo va disminuyendo la resistencia del aislante con el tiempo. El valor de n es una

manera de representar la calidad de la fabricación del aislante. A medida que pasa el tiempo el aislante se vuelve menos fiable y el riesgo para el sistema eléctrico aumenta. Como ya hemos explicado, la disminución de la intensidad de campo eléctrico necesaria para que se rompa el aislante se debe principalmente a las descargas parciales producidas en el mismo.

4.2.2.6. *Electroquímica-tracking*

Este tipo de ruptura en sólidos viene precedida de la aparición de un camino conductor, generalmente de carbón, en la superficie del aislante, que lo degrada y propicia la descarga de ruptura en el mismo. Para su formación el aislante debe contener una serie de sustancias orgánicas. Suele formarse por la carbonización de la superficie del aislante por acción de pequeñas descargas producidas por partículas contaminantes. Es más frecuente cuando se trabaja en exteriores. Este camino es más susceptible a la aparición de descargas eléctricas.

Hasta ahora hemos explicado los tipos de descargas en gases y en sólidos (ver Figura 28). Ahora vamos a explicar los tipos de ruptura en aislantes líquidos.

4.2.3. Ruptura en líquidos

Es el campo del que menos conocimiento se tiene. Algunos estudios son contradictorios. La dificultad básica por la que no se ha desarrollado una teoría general para explicar la ruptura en este tipo de aislantes es la falta de conocimiento sobre el comportamiento físico de los líquidos. Hay dos caminos de estudio principales.

Uno de ellos [Kuffel00] entiende el comportamiento y ruptura de los líquidos como una extensión del de los gases, causado por una avalancha e ionización. Parece apropiado para los líquidos extremadamente puros, pero no para los aislantes empleados en la industria.

El otro camino de estudio [Kuffel00] tiene en cuenta la importante influencia de las impurezas, tanto sólidas como burbujas gaseosas en los líquidos.

4.2.3.1. *Ruptura electrónica*

Los resultados experimentales [Kuffel00] sobre la conducción en aislantes líquidos bajo altas tensiones se ajusta a la teoría de canales desarrollada por Schottky [Kuffel00] (ver apartado 2.3.4). La teoría de ruptura electrónica dice que una vez tenemos un electrón libre, éste produce una ruptura dieléctrica si gana más energía del campo de la que pierde en las colisiones con las moléculas. Los electrones son acelerados hasta que obtienen la energía suficiente para ionizar a las moléculas del líquido al colisionar con ellas y así iniciar la avalancha. La condición de inicio de avalancha electrónica viene dada por la *Ecuación (35)* [Kuffel00].

$$e \cdot E \cdot \lambda = c \cdot h\nu \quad (35)$$

Donde E es el campo eléctrico aplicado, λ es el camino libre principal que recorre el electrón, $h\nu$ es la energía que necesita el electrón para la ionización y c es una constante arbitraria.

La teoría electrónica se ajusta muy bien a los valores de tensión de ruptura del dieléctrico líquido, pero no al tiempo de formación de la descarga.

4.2.3.2. Mecanismo de partículas sólidas en suspensión

Las impurezas sólidas pueden estar presentes en los aislantes líquidos. La fuerza que sufre una partícula en suspensión (supuestamente esférica de radio r y permitividad ε) en un líquido con permitividad ε_{liq} en presencia de un campo eléctrico E es:

$$F_e = \varepsilon_{liq} \cdot r^3 \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_{liq}}{\varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_{liq}} \cdot E \cdot \text{grad } E \quad (36)$$

Esta fuerza tiende a mover a la partícula a la zona donde el campo es más fuerte, siempre que la permitividad de la partícula sea mayor que la del medio ($\varepsilon > \varepsilon_{liq}$), mientras que si es menor ($\varepsilon < \varepsilon_{liq}$), como es el caso de las burbujas de aire, la fuerza tiende a moverla hacia la dirección opuesta. Este hecho tiende a juntar a las partículas en suspensión, alineándolas y formando un puente que facilita a la corriente el atravesar el dieléctrico líquido por ese camino. El campo en la zona de las partículas aumenta y se alcanza el valor de ruptura.

Debido a que se produce movimiento de las partículas en el seno del líquido, hay que tener en cuenta los procesos de difusión y por tanto el tamaño de las partículas. La Ecuación (37) [Kuffel00] muestra el valor del campo eléctrico de ruptura E_0 , en función del tamaño de las impurezas.

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_{liq}}{\varepsilon + 2 \cdot \varepsilon_{liq}} \cdot r^2 \cdot E_0^2 = \frac{1}{4} \cdot k \cdot T \quad (37)$$

Donde k es la constante de Boltzman y T es la temperatura absoluta en el líquido.

Gráficamente podemos ver la relación entre la intensidad del campo eléctrico y el radio de la partícula en suspensión de alta permitividad, para una temperatura fija de 300 °K en la Figura 34 [Kuffel00].

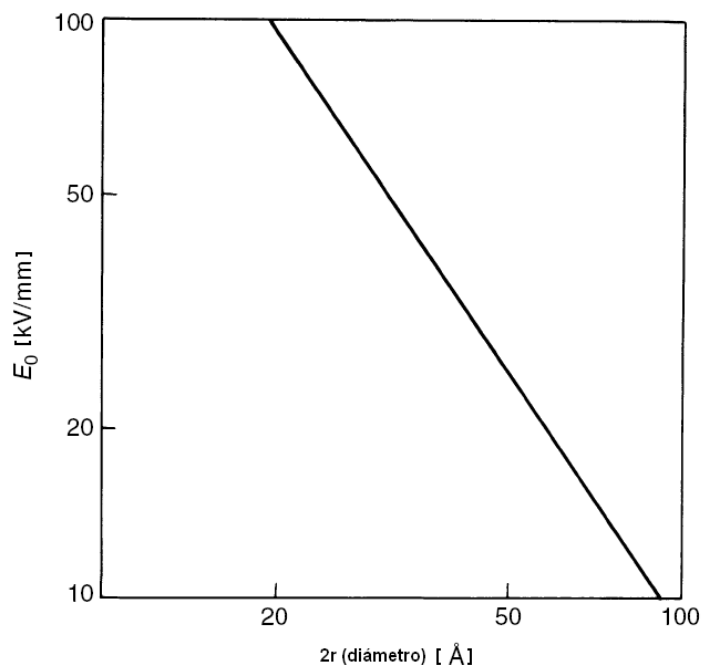


Figura 34. Relación entre la intensidad de campo eléctrico a ruptura y el tamaño de las partículas en suspensión del líquido

En esta figura se aprecia claramente que cuanto mayor es el tamaño de la impureza menor es el campo necesario para que se produzca la descarga en el aislante líquido.

4.2.3.3. Ruptura en las cavidades

Este tipo de ruptura se da cuando se forman burbujas de gas dentro del aislante líquido. Al ser menor la resistencia dieléctrica del gas que la del líquido la aparición de estas burbujas disminuye la capacidad aislante del líquido.

El campo eléctrico en una burbuja dentro de un líquido viene representado de forma simplificada en la Ecuación (38) [Kuffel00].

$$E_b = \frac{3 \cdot E_0}{\varepsilon_{liq} + 2} \quad (38)$$

Donde E_b es el campo eléctrico que soporta la burbuja cuando se le aplica un campo E_0 al líquido y ε_{liq} es la permitividad del líquido. Cuando el campo que soporta la burbuja supera el de ionización del gas que contiene se produce la ruptura dentro de esta burbuja. Esta descarga origina la aparición de otras burbujas, así como la degradación de las propiedades del líquido.

4.3. LA TENSION DE RUPTURA. LEY DE PASCHEN

La Ley de Paschen es la referencia principal cuando se trata de diseñar sistemas aeroespaciales con altas tensiones. Con esta ley se puede determinar la tensión mínima a partir de la cual se puede producir la ruptura del aire bajo campos eléctricos uniformes.

Esta ley sólo estudia el caso del espacio entre dos electrodos con un campo magnético constante. De todas formas se puede modificar para aplicarla a otros casos.

Tal y como muestra la *Ecuación (39)* [Paschen89], conocida como la ecuación de la Ley de Paschen.

$$V_b = \frac{a \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + b} \quad (39)$$

La tensión de ruptura (V_b) en un campo uniforme, sólo es función de la presión y de la separación entre los electrodos y es distinta para cada gas y electrodo; a y b son constantes que dependen de la composición del gas. La representación gráfica de la Ley de Paschen se muestra en la Figura 35 [Kuffel00].

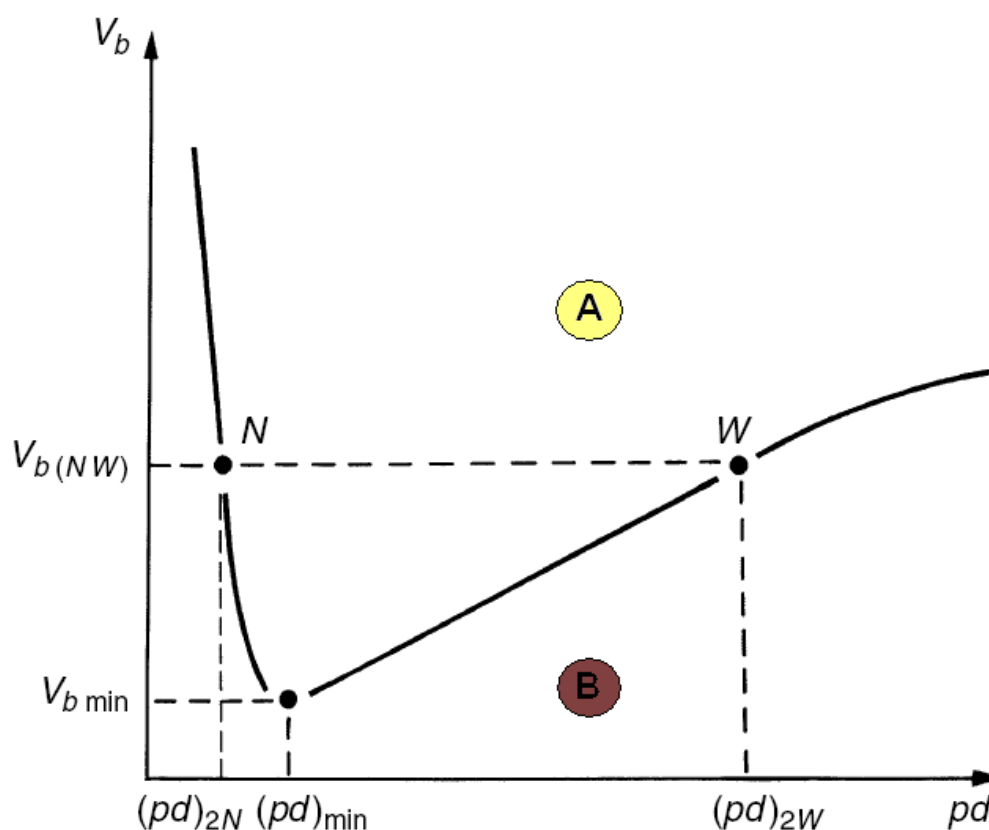


Figura 35. Curva de Paschen

Esta figura muestra cómo varía la tensión de ruptura del aire en función del producto de la presión por la longitud del entrehierro ($p \cdot d$) para campos eléctricos uniformes. Si nos situamos por encima de la curva (región A), se producirá la descarga disruptiva del aire y un arco eléctrico tendrá lugar. Si por el contrario nos situamos por el contrario por debajo de la curva (zona B), la energía aplicada por la tensión externa no será suficiente para desencadenar la descarga disruptiva. La curva de la Ley de Paschen tiene un mínimo tensión de ruptura $(V_b)_{min}$, que sólo se da para un determinado valor del producto de la presión por la distancia de separación entre los electrodos $[(p \cdot d)_{min}]$.

La Ley de Paschen representa el grado de eficiencia en la ionización producida por los electrones que atraviesan el entrehierro. Para que se produzca la descarga eléctrica deben darse dos condiciones indispensables. Por un lado la energía que se le suministre a los electrones debe ser tal que permita la ionización de los átomos del gas al colisionar con ellos. La segunda condición que debe producirse según Paschen es que debe existir un número mínimo de partículas en el aislante gaseoso para que se alcance una masa crítica que auto sustente la descarga. Si partiendo del valor mínimo de tensión de ruptura $(V_b)_{min}$, mantenemos constante la separación entre los conductores (d) y aumentamos la presión, la densidad del gas aumenta, por lo que se producen más colisiones entre los electrones y los átomos del gas. La descarga eléctrica no tendrá lugar en este caso debido a que aunque la cantidad de colisiones y por tanto de átomos del aislante es grande, la energía que ganan los electrones en su recorrido no es suficiente, con lo cual se precisaría de un mayor campo eléctrico externo para que los electrones obtengan la energía suficiente para ionizar a los átomos del gas. Si por el contrario se disminuye la presión por debajo del valor de tensión mínima, V_b en la Figura 35, los caminos libres medios que recorren los electrones son mayores, con lo que la energía cinética que ganan en su recorrido es grande. Sin embargo debido a que el número de colisiones es pequeño, dado que la densidad del gas es menor, no se llega a formar la avalancha electrónica y se precisaría de un mayor nivel de tensión para que se produzca la descarga disruptiva. Al mantener la presión constante e ir variando la separación entre los electrodos se tiene que para mayores distancias la energía que recibe el electrón es menor y por tanto no puede ionizar los átomos, mientras que si la distancia d es menor, aunque la energía que recibe el electrón es mayor, el número de colisiones que se producen es muy pequeña (debido al menor número de moléculas presentes) y se precisaría de una mayor tensión para poder crear la descarga.

El mínimo de la curva de Paschen marca por tanto la relación entre el número mínimo de colisiones necesarias y la energía mínima que se necesita para que se ionicen los átomos del gas.

Sería más correcto hablar de la influencia de la densidad del gas y de la longitud del entrehierro en vez de referirnos a la presión.

La Figura 36 [Kuffel00] muestra la relación experimental entre el coeficiente de ionización y la intensidad del campo ($\bar{\alpha}/p = f(E/p)$).

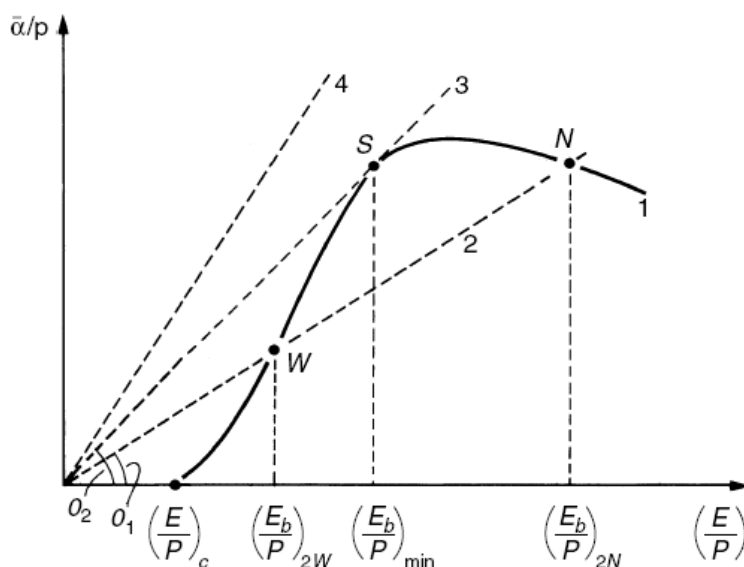


Figura 36. Relación entre el coeficiente de ionización ($\bar{\alpha}/p$) y el campo eléctrico aplicado (E/p)

La relación entre $\bar{\alpha}$ y E , está representada por la curva continua 1. Cada una de las rectas discontinuas representa un nivel de tensión aplicada, curvas 2, 3 y 4. Para valores pequeños de V (línea 4, Figura 36) no hay intersección entre la curva continua y la discontinua, lo que significa que no se produce ruptura o lo que es lo mismo, que se está por debajo de la tensión mínima de Paschen. Para tensiones mayores (línea 2, Figura 36) hay dos cortes en la curva, lo que significa que para una misma presión uno de los puntos se corresponde con el valor de longitud de separación entre conductores menor ($d1 \rightarrow N$) y otro con el mayor ($d2 \rightarrow W$). El punto tangente S se corresponde con el valor del mínimo de ruptura V_b .

Los puntos N y W están también indicados en la Figura 35.

Para calcular las tensiones de ruptura del aire se ha llegado a la *Ecuación (40)* [Kuffel00].

$$V_b = \left(\frac{E}{p}\right)_c \cdot p \cdot d + \sqrt{\frac{K}{C}} \cdot \sqrt{p \cdot d} \quad (40)$$

Donde E es el campo eléctrico, p es la presión del gas, d es la distancia entre los conductores y K/C es una constante.

Si sustituimos en la *Ecuación (40)* los siguientes valores: $p = 1 \text{ bar}$; $T = 20^\circ\text{C}$; $E_c = 24.36 \left(\frac{kV}{cm}\right)$; $\left(\frac{K}{C}\right) = 45.16 (kV)^2/cm$ obtenemos:

$$V_b = 6.72 \cdot \sqrt{p \cdot d} + 24.36 \cdot p \cdot d \quad [kV] \quad (41)$$

Podemos comparar los resultados teóricos de la *Ecuación (41)* con resultados experimentales [Kuffel00] en la Figura 37.

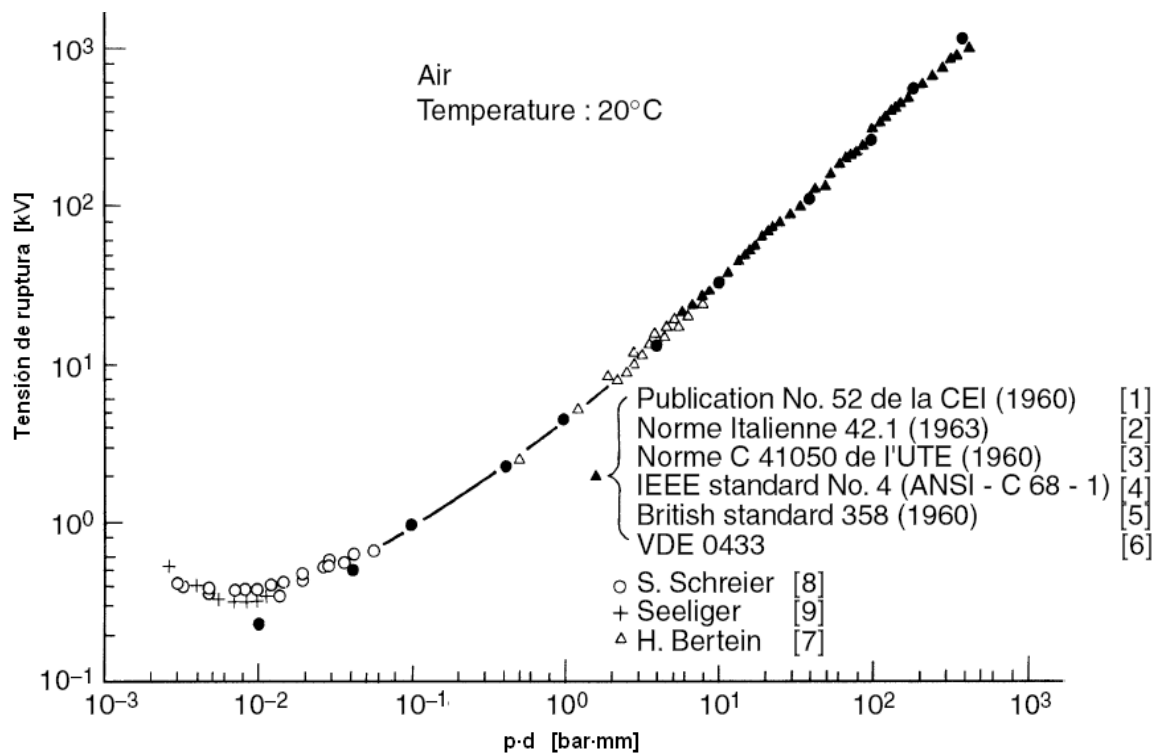


Figura 37. Curva de Paschen para el aire (círculos negros) a temperatura de 20°C calculada mediante $V_b = 6.72 \cdot \sqrt{p \cdot d} + 24.4 \cdot (p \cdot d)$

Donde se aprecia que la *Ecuación (40)* responde fielmente a la realidad, salvo para valores del producto $p \cdot d$ muy bajos (región con poco interés práctico). Varios análisis han concluido [Kuffel00], [Cotton08] que para unas condiciones normales del entorno (presión, temperatura, humedad...) la tensión de ruptura del aire está en torno a 320V. Esto quiere decir que un sistema que opera a 270Vdc con picos menores a 320V en los transitorios, no debería experimentar descargas entre cables sin aislante o con aislante muy fino en aire y con una presión de 760 torr. Si los transitorios superan los 320V es posible que se produzcan descargas. También se producirán si hay contaminantes o algún otro tipo de factor externo influyente.

La Tabla 5 [Kuffel00] muestra las tensiones mínimas de ruptura para varios gases, según la Ley de Paschen, así como los valores del producto $(p \cdot d)_{min}$ correspondientes a esas tensiones.

Tabla 5. Tensiones de ruptura mínimas para varios gases

Gas	Paschen minimum breakdown voltage, $(V_b)_{min}$, V	Product of gas pressure and electron separation, pd , at $(V_b)_{min}$, Pa·m
Air	327	0.754
Argon	137	1.197
Hydrogen	273	1.53
Helium	156	.532
Carbon dioxide	420	.678
Nitrogen	251	.891
Nitrous oxide	418	.665
Oxygen	450	.931
Sulfur dioxide	457	.439
Hydrogen sulfide	414	.798
Tetrafluoromethane	420	1.0
Sulfur hexafluoride	520	1.0

NOTA: ver el Anexo II sobre particularidades de las descargas.

4.4. EFECTOS PRODUCIDOS POR LAS DESCARGAS DISRUPTIVAS

Las descargas disruptivas son el peor suceso que se puede dar en el sistema eléctrico de un sistema embarcado, y en particular de un avión. Este tipo de descarga lleva asociado un gran aumento de la corriente y de la energía en el entorno cercano al arco. Si se produce en un ambiente de riesgo (en las cercanías de combustibles), el gran aumento de la temperatura hará que se produzca fuego en el avión, lo cual será catastrófico.

4.5. FACTORES INFLUYENTES

Al igual que en las descargas parciales (capítulo 3), en las disruptivas también hay diversos factores que influyen de manera significativa en la formación y características de los arcos eléctricos. Estos factores son:

4.5.1. Temperatura

Los efectos de la temperatura en las descargas disruptivas son los mismos que en las parciales (ver apartado 3.5.1). De forma simplificada se puede afirmar que a medida que aumenta la temperatura es más fácil que se produzcan descargas disruptivas.

Podemos corregir el efecto de la temperatura variando la presión.

4.5.2. Efecto de la frecuencia.

La frecuencia influye de tal forma en la tensión de ruptura que puede hacer que ésta disminuya hasta un 20% de su valor en condiciones de frecuencia normales. Este porcentaje de disminución se alcanza para frecuencias elevadas, por encima de la crítica.

La frecuencia crítica para presiones bajas sigue la *Ecuación (42)* [Cotton07].

$$f_{crit} = \frac{200}{p \cdot d} \quad [kHz] \quad (42)$$

Siendo p la presión en [bar] y d la distancia de separación entre los conductores en [mm].

De la *Ecuación (42)* se deduce que, a presiones menores, la frecuencia crítica aumenta, lo que es bueno para el caso de los aviones.

En la Figura 38 [Cotton07] se muestran algunas frecuencias críticas en función de la presión y de la longitud del entrehierro.

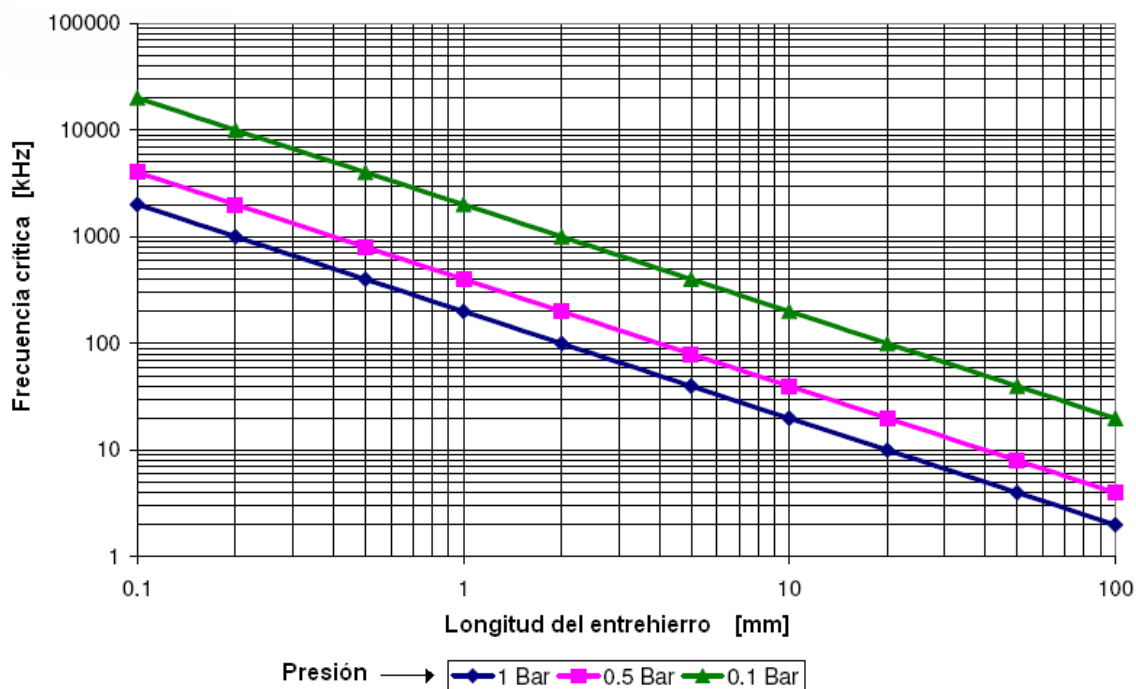


Figura 38. Frecuencias críticas a diferentes presiones

Vemos que el resultado de esta figura se ajusta a lo mostrado en la *Ecuación (42)*, ya que cuanto mayor es la presión y la longitud del entrehierro la frecuencia crítica es menor, así que será más fácil que la frecuencia del sistema supere a este valor de frecuencia crítica. Al superarse la frecuencia crítica el aislante se vuelve menos resistente al paso de corriente eléctrica y el

valor de la tensión mínima de ruptura disminuye. El hecho de que para presiones menores la frecuencia crítica aumente y por tanto la seguridad del sistema también es muy favorable para los sistemas embarcados de los aviones, que sufren una disminución de la presión al aumentar su altura de vuelo.

4.5.3. Partículas contaminantes

Las partículas contaminantes son peligrosas porque favorecen la acumulación de campo eléctrico en un punto, actuando como un electrodo. Dependiendo de la contaminación se puede llegar a reducir en un orden de magnitud el valor de la tensión de rotura.

Este factor afecta del mismo modo tanto a las descargas disruptivas como a las parciales, ver capítulo 3.

4.5.4. Efecto de la polaridad-Influencia de las partículas cargadas

En función de la polaridad de los electrodos que intervienen en la descarga eléctrica la tensión de ruptura del dieléctrico será mayor o menor.

A bajas presiones la tensión de ruptura es menor cuando los electrodos tienen polaridad negativa, debido a que el efecto de emisión electrónica por campo toma mayor relevancia. El aumento del campo eléctrico en el cátodo aumenta el segundo coeficiente de descarga de Townsend γ , lo que hace que la descarga se produzca con mayor facilidad.

A altas presiones el efecto de la polaridad es el contrario. En este caso la tensión de ruptura es mayor para disposiciones de polaridad positiva. Esto es debido al efecto de las partículas cargadas sobre la distribución del campo eléctrico en el entrehierro.

Las siguientes figuras [Kuffel00] muestran la variación del campo debida al efecto de las partículas cargadas con montaje de punta-plano, tanto para la polaridad positiva como negativa.

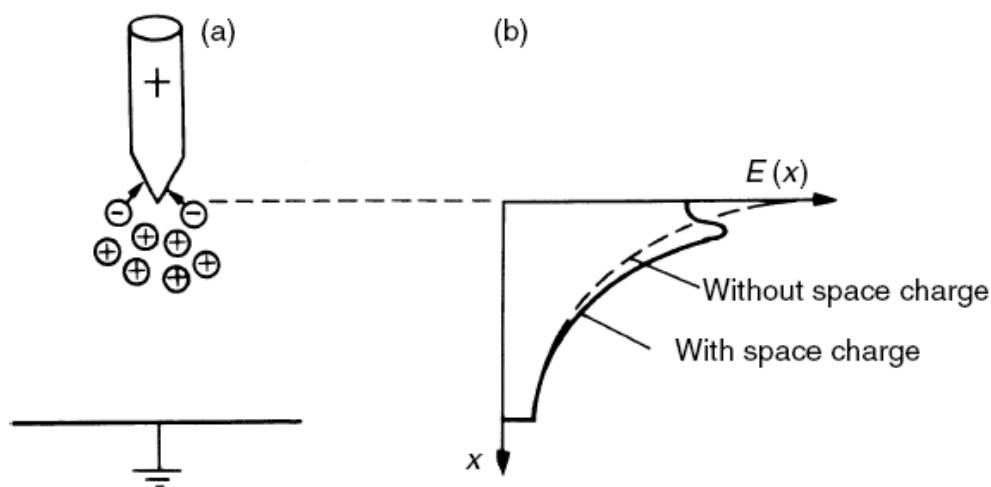


Figura 39. (a) Distribución de cargas en montaje de punta-plano positivo; (b) Distribución de campo por el efecto de las partículas cargadas

En el caso de que tengamos polaridad positiva (Figura 39), la ionización tiene lugar por la colisión de los electrones cerca del electrodo de punta, en la zona donde el campo es más fuerte. Como los electrones tienen mayor movilidad se aproximan más rápidamente al ánodo, dejando detrás una región cargada positivamente. El efecto de las partículas cargadas tiende a disminuir la fuerza del campo cerca del ánodo y a aumentarla lejos del mismo, ver, Figura 39 b). Para el caso de electrodos con polaridad negativa (Figura 40), los electrones son repelidos a la zona de menor campo y se juntan con las moléculas de los gases creando una masa capaz de volver a acercar las cargas positivas, que se encuentran cerca del electrodo.

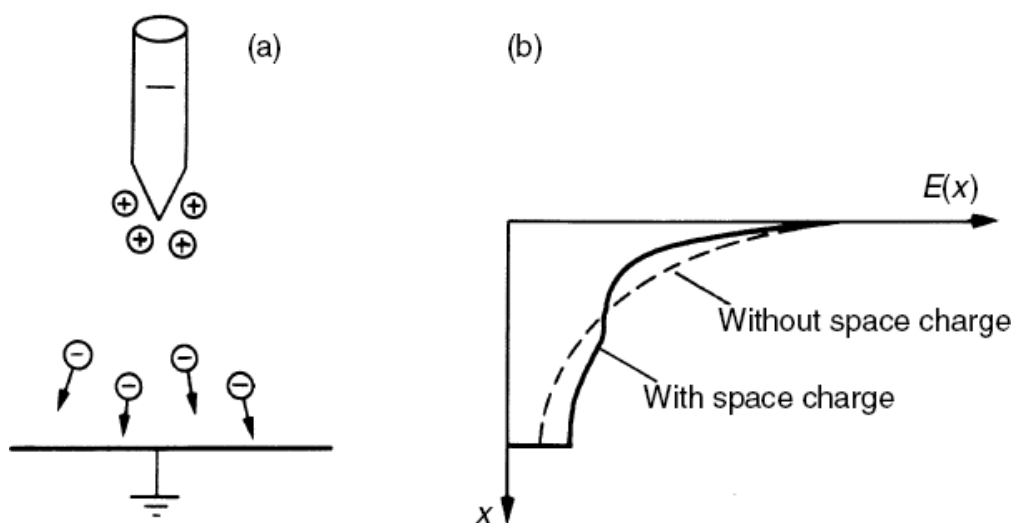


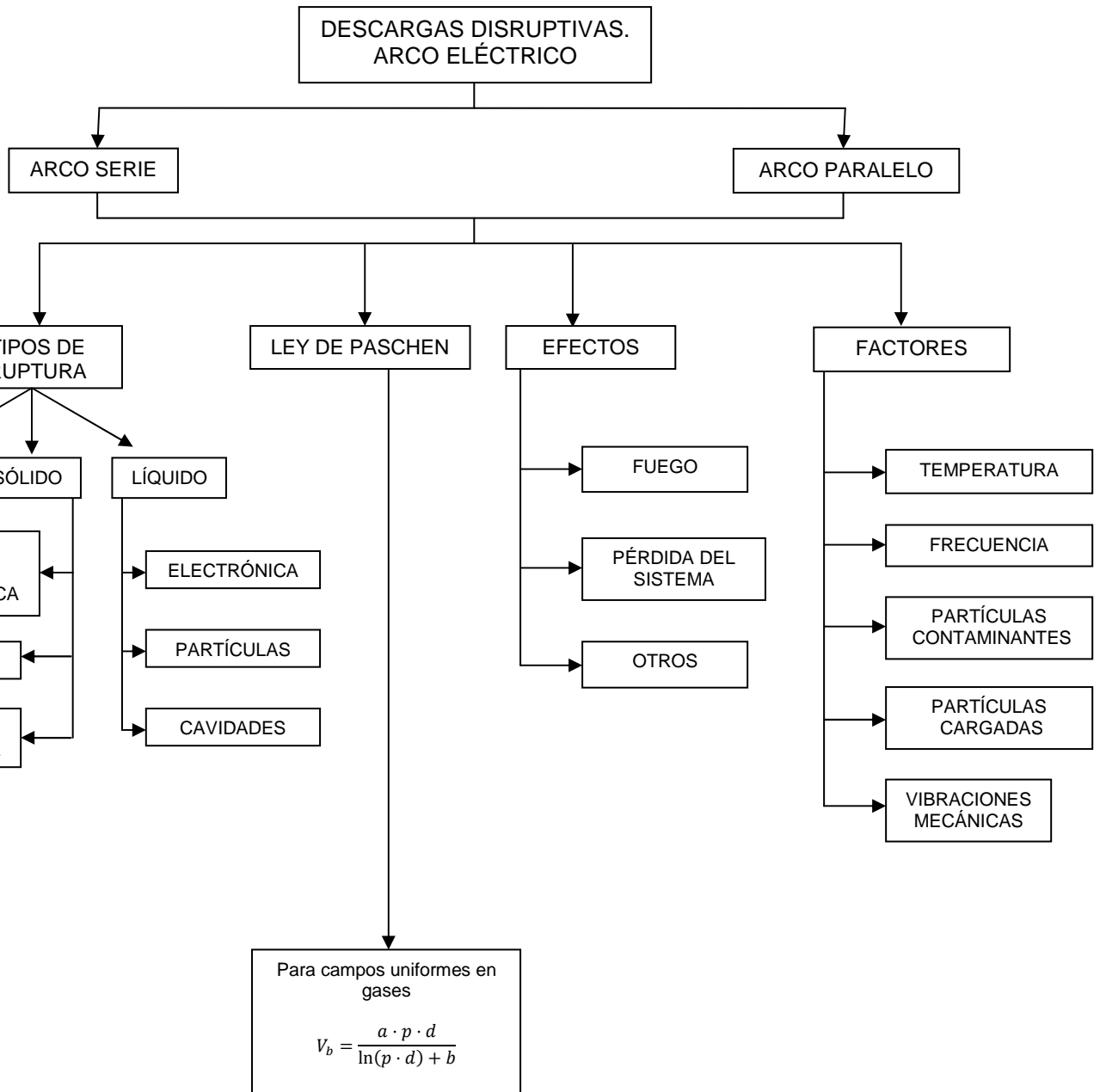
Figura 40. (a) Distribución de cargas en montaje de punta-plano negativo; (b) Distribución de campo por el efecto de las partículas cargadas

En las cercanías del electrodo el campo aumenta, ver Figura 40b), pero la región de ionización disminuye drásticamente. El efecto es que la ionización cesa.

4.5.5. Vibraciones mecánicas

El efecto de las vibraciones también es el mismo para las descargas disruptivas que para las parciales. Tal y como se explica en el apartado 3.5.4 del capítulo 3, las vibraciones son perjudiciales para el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos, ya que alteran los gap aislantes entre los cables, provocan fisuras en los aislantes sólidos y pueden incluso llegar a desconectar algún cable.

CAPÍTULO 4. DESCARGAS DISRUPTIVAS



CAPÍTULO V:

PROTECCIÓN ACTUAL DE SISTEMAS ELÉCTRICOS EMBARCADOS ANTE DESCARGAS ELÉCTRICAS

5. PROTECCIÓN ACTUAL DE SISTEMAS ELÉCTRICOS EMBARCADOS ANTE DESCARGAS ELÉCTRICAS

En lo referente a los sistemas de protección ante descargas eléctricas cabe destacar que casi todos los estudios realizados y dispositivos desarrollados se centran en las descargas disruptivas. Además es importante resaltar que todos los esfuerzos se están centrando en la detección de la aparición de la falta, su localización y eliminación.

Debido a los nuevos rangos de tensión que se van a emplear en los aviones más eléctricos (MEA), los sistemas de protección ante descargas toman gran relevancia a la hora de hacer posible la implantación de los nuevos sistemas de distribución de potencia eléctrica (SDP) de forma segura en los aviones. La nueva filosofía de los MEA se basa en que se sustituyan los sistemas mecánicos e hidráulicos empleados actualmente por otros eléctricos. Debido al aumento de la demanda eléctrica, se va a precisar un mayor nivel de potencia. Para poder hacer que esta idea sea viable en plataformas aeronáuticas se tiene que conseguir que el peso del cableado no sea muy elevado. Éste es el motivo por el cual se emplearán tensiones mayores y SDP diferentes a los actuales.

5.1. PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS PARCIALES

Las protecciones frente a las descargas parciales hacen referencia únicamente a los sistemas eléctricos. Este tipo de descargas son muy difíciles de detectar y localizar, debido a que son de muy corta duración y suceden de forma intermitente y aleatoria. A veces se dan dentro del propio aislante, en los huecos del mismo. Son difíciles de diferenciar de los transitorios que se producen en el funcionamiento normal del sistema. Por éstos y otros motivos aún no se ha desarrollado ningún dispositivo capaz de detectarlas, localizarlas y eliminarlas. Como medida de protección-prevención ante las descargas parciales se proponen una serie de recomendaciones mostradas a continuación.

5.1.1. Recomendaciones frente a descargas parciales con tensiones superiores a 250V_{pico}:

- Evitar los huecos en los aislantes, ya que el gas en dichas cavidades puede tener una presión crítica y provocar una descarga eléctrica en el hueco, deteriorando el aislante.
- Evitar la entrada de partículas ionizadas o electrones provenientes del ambiente (contaminantes). Hay que evitar en la medida de lo posible las altas tensiones en las proximidades de las zonas abiertas al ambiente exterior.

- Controlar la uniformidad de los campos eléctricos, dado que la mayoría de las descargas parciales se producen bajo el efecto de campos eléctricos no uniformes.
- Usar materiales que eviten los gradientes de tensión en los aislantes.
- Por encima de 5000V es necesario el sellado hermético de los circuitos, que deben operar a presiones mayores de 10^{-2} N/m². En estos casos es aconsejable emplear como aislante un gas con una elevada resistencia dieléctrica en lugar de aceite. En el aceite se pueden crear burbujas que ocasionen rotura dieléctrica en ellas. La compatibilidad de los materiales en alto tensión es muy importante.
- Seleccionar materiales y dimensiones que puedan resistir los casos más desfavorables.
- Elegir aislantes con la mayor resistencia dieléctrica y con la menor constante dieléctrica posibles.
- Tomar como valores de diseño los valores pico (más desfavorables).
- Eliminar las discontinuidades dieléctricas, evitando que las constantes dieléctricas de los aislantes sean muy diferentes.
- Evitar condensaciones durante la operación.
- Conseguir uniones óptimas entre los conductores y los aislantes.

Es preferible tratar de diseñar para evitar las descargas parciales, que asumir la disminución del tiempo de vida de los aislantes.

5.2. PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS DISRUPTIVAS

Últimamente se ha reconocido la importancia del efecto que producen los arcos eléctricos en los sistemas eléctricos embarcados, especialmente en los aéreos. Debido al gran número de horas de vuelo que se pierden a causa de estas descargas, se han realizado muchos estudios sobre cómo poder tratar esta problemática. Como resultado han surgido numerosos métodos para la detección y localización de estas faltas en los sistemas embarcados. Gracias a las características físicas particulares de los arcos eléctricos es posible determinar cuándo y dónde se han producido. Los métodos de detección de faltas por arco empleados se resumen en la Figura 41 [Guangiun08].

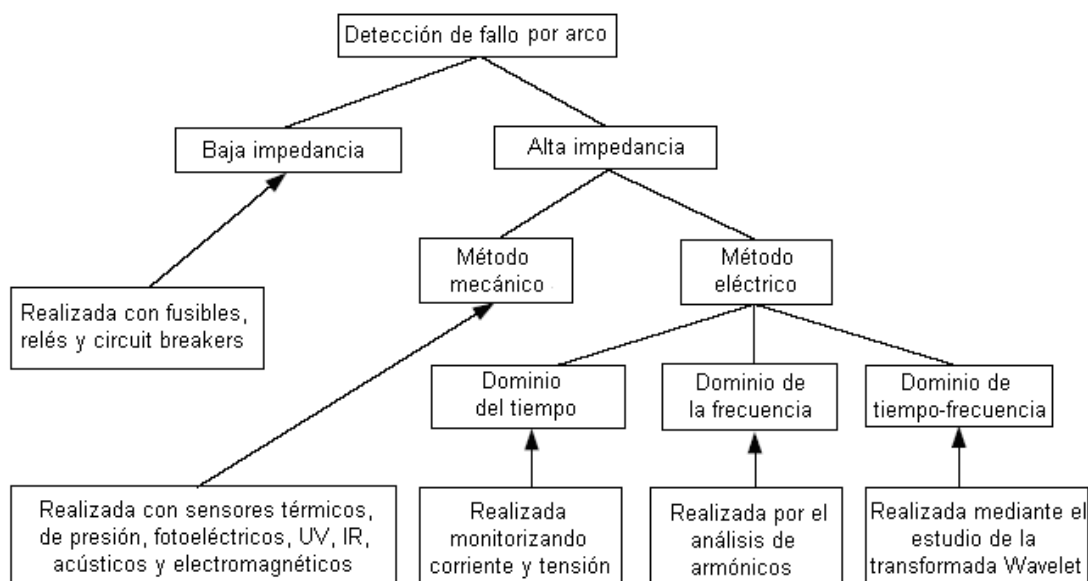


Figura 41. Clasificación de los métodos de detección de las faltas por arco

La detección de arcos de baja impedancia se realiza por medio de los dispositivos de protección implantados. Estos arcos son de tal magnitud que obligan al aislamiento automático del circuito. Podemos detectar pues que se han producido cuando se ha abierto un circuit breaker, un relé o cuando se funde un fusible.

Los demás métodos de detección se centran en los arcos de alta impedancia, que por sus características son más difíciles de detectar. Casi todos los métodos de detección de arcos de alta impedancia son mecánicos o eléctricos.

5.2.1. Métodos de detección mecánicos

Los factores que se emplean para identificar la falta son:

- El aumento de presión y temperatura.
- Señales ópticas.
- Señales acústicas.
- Campo magnético fácilmente detectable con una bobina o una radio AM.

El sistema de detección de la Figura 42 [Guangiun08] reúne varias de estas características, como la señal acústica, los infrarrojos y las radiaciones electromagnéticas.

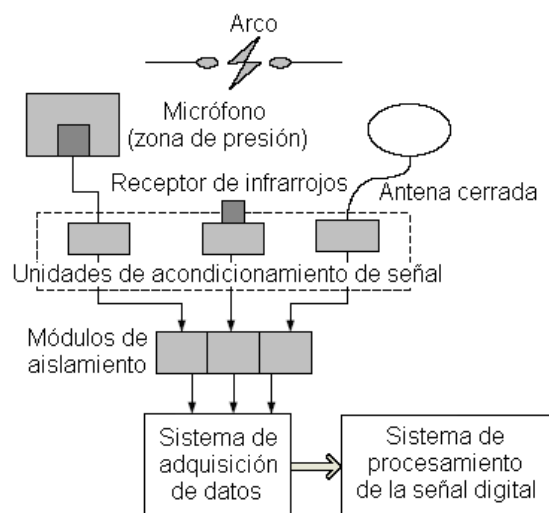


Figura 42. Esquema de sistema de detección de arcos

A parte de los altos costes de instalación y mantenimiento de los sistemas de detección mecánicos, está el inconveniente de que para que las medidas sean fiables, los sensores deben estar muy próximos al lugar de la falta, lo cual no es práctico. Además la detección de las variaciones electromagnéticas y sonoras puede llevar a error.

5.2.2. Métodos de detección eléctricos

Se basan en las variaciones de la corriente y la tensión. Los métodos empleados son:

5.2.2.1. *Análisis en el dominio del tiempo*

Se realizan análisis en el dominio del tiempo de la tensión y la corriente, y se comparan los valores medidos con los valores límite.

5.2.2.2. *Análisis en el dominio de la frecuencia. Transformada de Fourier*

La Transformada de Fourier [Oppenheim98], [Guangiun08], [Papoulis85], [Svoboda00], pasa del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, así es posible la comprensión y análisis de señales continuas. Según la teoría de Fourier cualquier función (o señal) puede descomponerse en la suma de senos y cosenos. La Transformada Discreta de Fourier (TDF) descompone las señales en un espectro de frecuencias. En el dominio de la frecuencia el contenido armónico de las corrientes de arco de fase y neutro son comparadas con los valores normales de funcionamiento para detectar si se ha producido el arco eléctrico.

5.2.2.3. *Análisis en el dominio de la frecuencia y el tiempo. Transformada Wavelet*

A diferencia del análisis de Fourier, la Transformada Wavelet tiene información de tiempo y frecuencia, lo que los hace idóneos para su uso con señales no estacionarias, como las de los arcos. Las pruebas realizadas [Guangiun08] determinan que son mejores que los métodos de detección mecánicos, sobre todo en lo referente a la fiabilidad.

El comportamiento no lineal de los arcos distorsiona otras tensiones y corrientes del sistema.

Esta transformada ha sido empleada en la detección de faltas por arco en líneas con gran impedancia. Gracias a este análisis se puede distinguir entre los transitorios de operación y las faltas.

De los tres métodos de detección eléctricos descritos anteriormente cabe destacar que:

- Los métodos basados en el dominio del tiempo no siempre son efectivos para la detección de arcos, ya que en el dominio del tiempo estas faltas no se diferencian de los transitorios de operación normales.
- La mejor herramienta de análisis en el dominio de la frecuencia, la Transformada de Fourier, es muy buena para señales estacionarias. Sin embargo, debido al carácter intermitente de las faltas por arco, generalmente causadas por las vibraciones, este método tampoco es muy apropiado.
- La detección mediante la Transformada Wavelet es pues, la mejor herramienta para la detección de faltas por arco con grandes impedancias.

Cabe destacar que ninguno de los tres métodos es completamente fiable y definitivo, por lo que se está estudiando la posibilidad de desarrollar nuevos métodos que junten las características de varios de los anteriormente mencionados.

5.2.3. Tecnologías de localización de las faltas

Para localizar el lugar de un fallo en un cable se emplean métodos como la inspección visual o la medida de la impedancia. Se ha propuesto incluso una técnica basada en medir la propagación de las ondas sonoras que provoca el arco [Guangiun08]. A continuación vamos a explicar algunos de estos métodos de localización.

5.2.3.1. *Reflectometría*

La reflectometría es la técnica más prometedora para detectar aplastamientos, roturas, pequeños agujeros o cualquier tipo de defecto en los cables. Forma parte de muchos de los métodos que se emplean en este tipo de diagnósticos.

Consiste en enviar una señal de tensión a altas frecuencias y medir el retorno o reflejo de la misma. En función de la naturaleza de la señal de entrada la reflectometría puede denominarse como de dominio del tiempo (o “Time Domain Reflectometry” TDR), dominio de la frecuencia (o “Frequency Domain Reflectometry” FDR), secuencia de dominio del tiempo (o “Secuence Time Domain Reflectometry” STDR), propagación del espectro en el dominio del tiempo (o “Spread Spectrum Time Domain Reflectometry” SSTDR), multicarrera (o “Multi Carrier Reflectometry” MCR) y reflectometría en el dominio del ruido (o “Noise Domain Reflectometry” NDR).

Con TDR la señal suele ser cuadrada y el fallo se calcula gracias al retraso de la onda enviada al volver. Se precisa de un experto para interpretar los resultados. Es necesario un sistema extremadamente preciso y cuyo mantenimiento es muy costoso. Además, las vibraciones pueden conllevar a error, con lo que este método es difícil de implantar.

En FDR se lanzan un conjunto de ondas sinodales con pasos de frecuencia y se mide la onda que regresa. Si se toma como valor a interpretar la diferencia de fases entre la onda de salida y la de llegada estamos ante una reflectometría de fase (o “Phase Detection Reflectometry” PDR).

La reflectometría de onda estable (o “Standing Wave Reflectometry” SWR) mide la onda estable producida por la superposición de las ondas incidentes y de llegada.

En el caso de la onda continua de frecuencia modulada (o “Frequency Modulated Continuous Wave” FMCW) el conjunto de ondas enviadas varían su frecuencia de forma ascendente, generalmente de forma lineal, midiendo la diferencia entre frecuencias.

Sólo las técnicas STDR y SSTDR se emplean con cables vivos (de potencia). Éstas técnicas emplean señales de muy bajo tensión (tipo ruido) con forma sinodal modulada y miden la diferencia entre la señal incidente y la reflejada para determinar el tipo de fallo y su localización.

Las técnicas de reflectometría activa tienen los inconvenientes de que las señales reflejadas pueden inducir a error y no ser tan exactas como debieran ser.

5.2.3.2. Inspección visual

La inspección visual es lenta y tediosa y no analiza toda la longitud del cable. Cuando se hace un análisis intrusivo se hace más mal que bien, ya que hay que quitar las sujeciones de los cables para ver si en esas zonas, antes inaccesibles, el cable está chafado o roto. Además no siempre permite localizar los fallos intermitentes.

5.2.3.3. Control de la impedancia

El otro método más empleado es el de medir la impedancia de un cable de un extremo a otro. Una resistencia baja significa que el cable está bien y una elevada implica que el cable está roto. La resistencia, capacidad e inductancia por unidad de longitud de un cable es bien conocida, por lo que se puede

calcular el punto donde se ha producido el fallo. Esta distancia se puede calcular a partir de la *Ecuación (43)* [Guangiun08].

$$L = \frac{(V_{source} - V_{load})}{I_{source} \cdot \tau} \quad (43)$$

Donde V_{source} es la tensión en la fuente, V_{load} es la tensión en la carga, I_{source} la corriente en la fuente, τ es una constante conocida que hace referencia a la resistencia por unidad de longitud. Y L es la longitud donde está el fallo en el cable.

Para cables muy cortos este método es más preciso que la reflectometría. También puede usarse con mucha precisión en cables largos, pero no en redes ramificadas.

5.2.3.4. Sonido

Gracias a que la velocidad del sonido viaja a una velocidad casi constante en un medio, puede usarse para calcular la posición de los fallos por arco. Gracias a las medidas de varios sensores se puede calcular la posición del sonido de origen. Este método es impracticable en muchos casos donde se debería poder usar, como es el caso de entornos con vibraciones.

5.2.3.5. Test de alta tensión

Los test de alta tensión miden la fuga de corrientes en los cables cuando se les aplica una tensión continua elevada. De esta forma se fuerza el arco en la zona dañada del cable. Este método no es aplicable en entornos con riesgo de incendio o explosión. También puede dañar los equipos, por lo que se realizará con todas las cargas desconectadas.

5.2.3.6. PASD

El Pulse Arrested Spark Discharge (PASD) ha sido verificado como un método de diagnóstico del aislante eficaz [Guangiun08]. La técnica PASD consiste en exponer a los cables a pulsos de alta tensión y baja energía para forzar el arco en los defectos de los cables. Es una mezcla del método de test de alta tensión y la técnica del dominio del tiempo de la reflectometría. Un esquema de este método se muestra en la Figura 43 [Guangiun08].

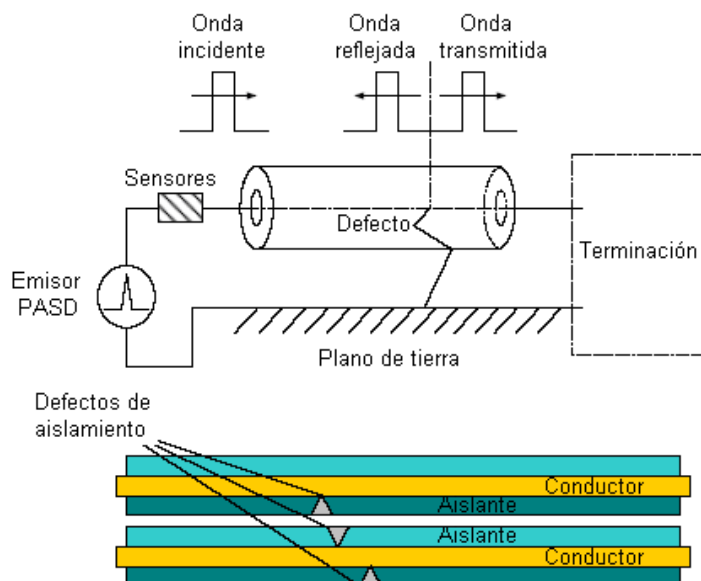


Figura 43. Localización del arco mediante PASD

5.2.4. Dispositivos de protección

Las mejores soluciones disponibles, así como los futuros dispositivos que se van a desarrollar para la protección de sistemas eléctricos, principalmente en plataformas aeronáuticas, se explican a continuación.

5.2.4.1. *Circuit Breakers*

Actualmente, el circuit breaker (CB) es la protección más empleada a la hora de proteger los cables en los SDP embarcados de una aeronave. El CB es un elemento de protección, que se abre ante una corriente por encima de ciertos límites, si es mantenida durante un determinado tiempo. Esto impide daños en los cables o equipos situados aguas abajo. El CB tiene un uso bastante extendido en todo tipo de aeronaves, tanto en AC como en DC. Los CB pueden ser monofásicos ($28 V_{DC}$ o $115 V_{AC}$) o trifásicos ($115 V_{AC}$).

El CB está constituido por un elemento sensible a la corriente que lo atraviesa (sensor magneto-térmico), que se dilata al calentarse por el paso de la corriente. De este modo, cuando se alcanzan ciertos niveles de temperatura, se produce la apertura del CB.

Teniendo en cuenta esto, el CB solo actúa cuando ciertos niveles de corriente circulan por el dispositivo durante el tiempo suficiente para calentar el componente y provocar la apertura, tal y como se aprecia en sus curvas de funcionamiento (Figura 44 [Mussmacher04]). En esta figura, se puede producir una apertura del CB, ante niveles de corriente del 1000% del rango de corriente nominal, en un tiempo de 0.08 a 0.3 segundos, ó se puede activar la protección con niveles de corriente del 165 % de la corriente nominal, en tiempos que van desde los 20 a los 250 segundos.

Las causas de activación de un CB son generalmente producidas por anomalías en la carga eléctrica o en el cableado asociado. Una vez abierto el CB, se puede cerrar nuevamente de forma manual, aunque es importante tener presente que un intento de reenganche del propio CB puede agravar el daño eléctrico, ya que puede producir la propagación de la sobrecorriente que inicialmente produjo la apertura del CB, con los posibles riesgos de afectar a otros equipos. De hecho, la compañía fabricante de aviones, AIRBUS no autoriza el reenganche de los CB en vuelo, salvo casos muy justificados y emergencias, en las cuales es absolutamente necesario para la seguridad del propio vuelo [Izquierdo08].

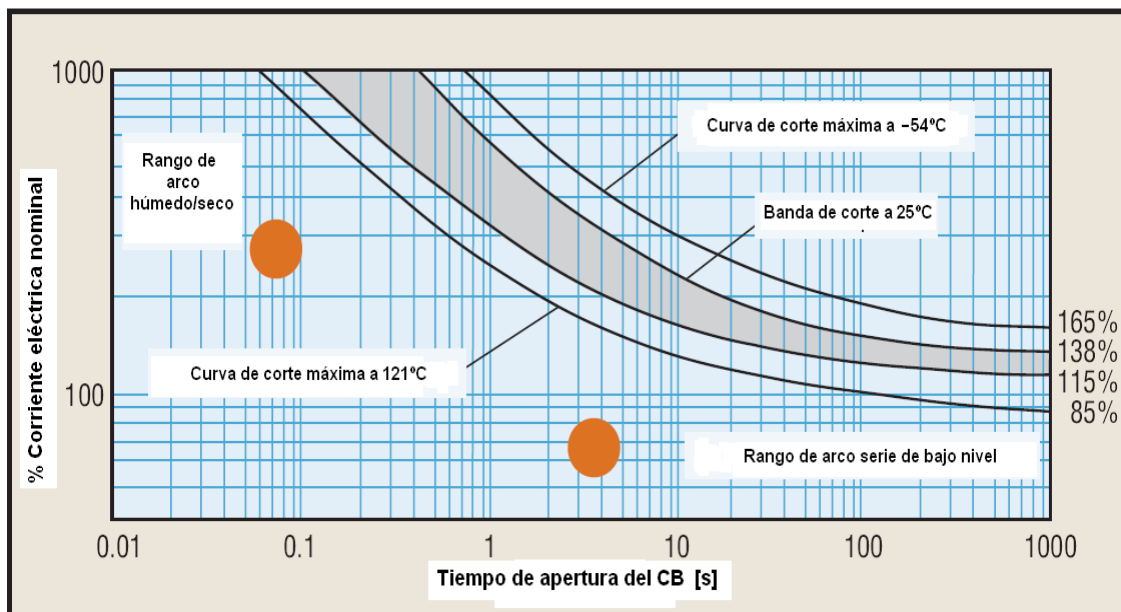


Figura 44. Curvas características típicas de un Circuit Breaker

El gran problema de los CB es que no son capaces de proteger frente a fallos por arco, ya que este tipo de descargas, si bien liberan una gran cantidad de energía, no son capaces de calentar el bimetálico del CB y por lo tanto no activan la protección. Los fallos por arco pueden durar del orden de milisegundos. Una serie de estos eventos puede durar entorno a 20-30 milisegundos, siendo demasiado fugaces para provocar la activación del CB. Sin embargo, estos arcos, no detectados por el CB, aumentan la temperatura del entorno del arco, pudiendo causar daños catastróficos al cable tales como la ignición del aislante o combustible cercano al cable. Se han llegado a dar casos donde se han producido llamas, en los cuales el CB aguas arriba del cable dañado estaba intacto. En la Figura 44 [Mussmacher04] se han marcado con puntos naranjas los rangos en los que se producen los arcos eléctricos. Cabe destacar que se encuentran en la zona de no activación de la protección de los CB.



Figura 45. Panel de Circuit Breaker

Además de los inconvenientes citados anteriormente sobre la posible no detección de faltas por arco, debemos tener en cuenta que la monitorización de los CB es compleja, por el espacio necesario para su emplazamiento y el bajo nivel de control que permiten, ver Figura 45 [Potter08]. Todo ello supone un incremento de peso y equipos dentro del avión, tales como las Unidades de Monitorización de los Circuit Breakers. Esto, añadido a que el CB no protege de muchas de las perturbaciones descritas anteriormente, así como las falsas actuaciones por sobre-temperatura, permite concluir que los CB no son un dispositivo muy apropiado para ser incluido en las nuevas arquitecturas de distribución de potencia eléctrica. Es necesario por tanto, plantearse el desarrollo de tecnologías alternativas de protección para los nuevos diseños de SDP.

5.2.4.1.1. Circuit Breaker Electrónico (ECB) basado en SiC

Este CB semiconductor basado en SiC tiene la ventaja de la eliminación del ruido y descargas en las conmutaciones. Además es más selectivo y determina de manera efectiva la potencia, gracias a sus sistemas de medida de corriente y tensión. Los beneficios de usar los semiconductores de SiC radican en la disminución de las pérdidas, su gran robustez, que permite la protección totalmente electrónica, así como la capacidad de medir las sobrecargas, gracias a sus sensores de corriente y tensión. También dispone de un sensor de temperatura. Los resultados de los estudios de este dispositivo [Handt08] en la protección ante arcos eléctricos concluyen que son el siguiente paso en la creación de un CB totalmente electrónico.

Para conseguir una mejor protección de los sistemas eléctricos es necesario detectar los cortocircuitos y las sobrecargas y eliminarlas lo más rápidamente posible. Los CB semiconductores son mucho más rápidos y disminuyen los picos de corriente mejor que los mecanismos mecánicos (del orden de 10-1000 veces). Además pueden conmutar sin ruido ni descargas y a mayores frecuencias. Este dispositivo también puede ser controlado remotamente. Un único CB puede ser usado para múltiples tipos de fallos y rangos de corrientes. El esquema de este tipo de CB se muestra en la Figura 45 [Handt08].

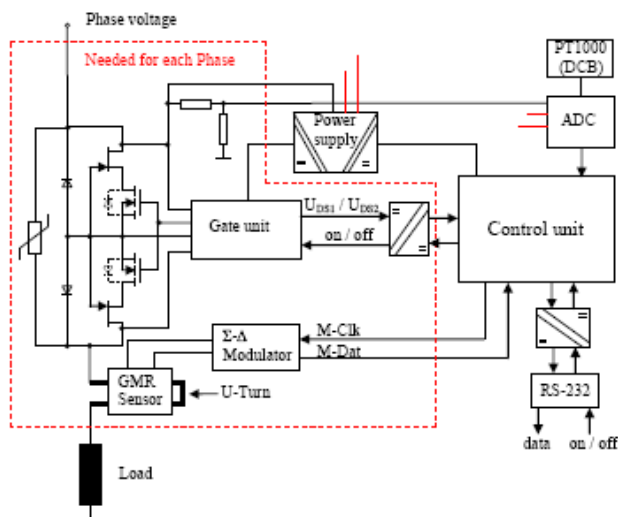


Figura 46. Esquema del CB semiconductor con base de SiC

El dispositivo puede tener una fuente de alimentación propia que lo hace autosuficiente.

Para realizar las medidas del circuito se emplea el dispositivo de la Figura 47 [Handt08].

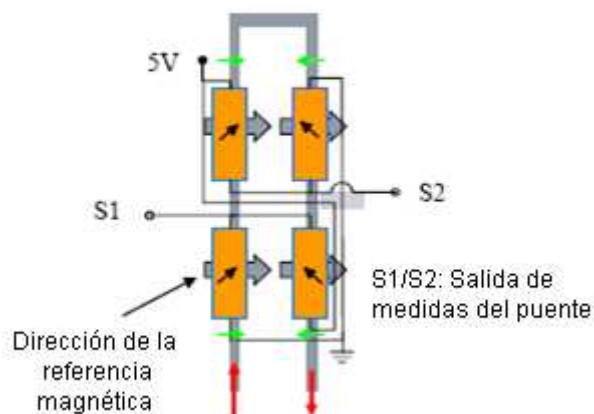


Figura 47. Dispositivo de medida del CB semiconductor

Donde el terminal S1 mide la tensión y el S2 la corriente.

El modo de operación de este dispositivo consiste en que primero se detectan los tipos de cargas que hay con un test previo (señal de reconocimiento). De esta forma sincronizará la apertura del circuito justo antes del paso por cero de la tensión y lo volverá a cerrar al siguiente paso por cero de la corriente. Esta operación varía en función del tipo de carga (resistiva, inductiva y capacitiva).

Para la protección ante sobrecargas se emplea un sensor térmico. Si la temperatura sobrepasa un valor límite el CB se desconecta.

Toda la información puede controlarse de forma remota on-line. Se emplea en sistemas AC.

Para más información específica sobre los límites de funcionamiento de este dispositivo se recomienda ver referencia [Handt08].

5.2.4.2. Arc Fault Circuit Breakers (AFCB)

Los AFCB son relativamente nuevos en el área de los circuitos de protección. Estos dispositivos proporcionan protección térmica por sobrecarga, al igual que los CB convencionales, además de una protección frente a los posibles eventos originados por arcos eléctricos, ver Figura 48 [Izquierdo08_bis]. Asimismo, estos componentes mantienen la cuenta de cada una de las interrupciones momentáneas del aislamiento, y provoca una interrupción del circuito cuando el número de estas interrupciones excede una cantidad prefijada por los algoritmos de control del componente. Señalar, que la temperatura causada por estos contactos intermitentes puede ser inferior al alcanzado en un dispositivo magneto-térmico, como los Circuit Breakers [Izquierdo08].

La tecnología de los AFCB fue introducida en un principio dentro del mercado industrial y domestico. Se está adaptando este tipo de tecnología para poder emplearse en plataformas aeronáuticas debido a la mejora en la seguridad que supone su uso. Gracias a estos dispositivos se reducirán el número de fallos provocados por arco y sus desastrosas consecuencias. Además, se reducen costes al disminuir los daños tanto del cableado eléctrico, como de las áreas colindantes situadas próximas al arco.

El AFCB está incluido dentro de las investigaciones de nuevas tecnologías para la mejora de la seguridad del cableado, tema clave para algunas agencias como la Agencia Federal de Aviación (FAA). Se pretende determinar los mecanismos que llevan al proceso de envejecimiento, así como desarrollar las herramientas para mejorar la inspección y mantenimiento del cableado. También busca desarrollar tecnologías que disminuyan o eliminen los riesgos de un fallo en el cableado. Dentro de este programa de investigación se ha dedicado una parte únicamente para el estudio de los dispositivos de interrupción ante un fallo por arco [Izquierdo08].



Figura 48. AFCB

En el año 2000 el fabricante de aviones AIRBUS, decidió lanzar su propio programa de AFCB, similar al de la FAA citado anteriormente. Este programa incluye test sobre prototipos definidos por los propios fabricantes de AFCB, ensayos en banco de pruebas en laboratorios y posteriormente ensayos en vuelo. El proceso se completa con la evaluación de la madurez del componente embarcado en avión durante un tiempo estimado de seis meses [Izquierdo08].

Actualmente las recomendaciones de ATSRAC (Aging Transport Systems Rulemaking Advisory Comite) indican la necesidad de un estudio en profundidad para la evaluación de los daños colaterales del cableado cuando son protegidos por los AFCB. Se tienen que precisar también los costes y beneficios de la implementación de los AFCB.

Los AFCB contienen una sofisticada electrónica, la cual muestrea la corriente que lo atraviesa en intervalos de sub-milisegundos. A partir de la forma de onda de la corriente muestreada, y gracias al análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia de esta señal (ver apartado 5.2.2), se hace posible la detección del fallo por arco, y de este modo, se impide que se vuelva a repetir. La identificación se basa en discriminar el fallo por arco, mediante el uso de patrones y algoritmos, de una corriente de funcionamiento normal.

Dependiendo de la complejidad de los patrones y algoritmos del AFCB, se pueden llegar a diferenciar los fallos por arco de otras señales que se le asemejen, como pueden ser los transitorios durante el arranque o apagado de un motor, o las demandas pulsantes de corriente del motor durante el funcionamiento normal.

Sin embargo, este tipo de dispositivo sigue presentando la misma problemática de monitorización que los CB y no permite su control remoto, por lo que hace necesario la búsqueda de nuevas tecnologías.

5.2.4.3. Arc Fault Current Interrupter (AFCI)

Un Arc Fault Current Interrupter (AFCI) es una técnica relativamente nueva para la protección de circuitos. Los CB abren el circuito en un periodo de tiempo determinado, cuando detectan sobrecargas de corriente. Un AFCI detecta y neutraliza un arco eléctrico cuando éste se produce. En AC el AFCI abre el circuito cuando la corriente pasa por su valor cero, mientras que en DC no se puede disfrutar de esta ventaja. Se han realizado experimentos [Spyker05] para ver la viabilidad de los sistemas de protección AFCI empleados generalmente en AC, cuando se emplean en DC. En particular se ha pensado en su aplicación en aviones (presión, 270 V_{DC}...).

La gran mejora que introduce el AFCI es que es capaz de diferenciar entre el cierre momentáneo de un contactor o entre un pequeño arco de apertura (ambas provocadas por el normal funcionamiento del sistema) y una falta sostenida o arco.

Teniendo en cuenta que la tensión que se espera emplear en los nuevos sistemas de distribución de potencia de los aviones es continua (DC), el empleo de estos dispositivos es menos indicado que el de los AFCB para tensión continua.

5.2.4.4. Remoted Control Circuit Breakers (RCCB)

El Circuit Breaker de Control Remoto (RCCB), de reciente aplicación, es una combinación de relé y Circuit Breaker (véase la Figura 49 [Izquierdo08_bis]).



Figura 49. RCCB fabricado por E-T-A

De este modo, el funcionamiento de un RCCB es similar al de un CB con la salvedad que permite el control remoto del dispositivo. En estos dispositivos el sistema de conmutación está operado por circuitos electrónicos incorporados en su interior, ver Figura 50 [Izquierdo08].

Los RCCB no presentan el problema por envejecimiento que se puede producir en los CB, como consecuencia de los ciclos térmicos que tiene que soportar el bimetálico. En sustitución del bimetálico, el RCCB incorpora una parte electrónica de monitorización y control. Cabe destacar que los ciclos de vida es un factor importante en las aplicaciones aeroespaciales y militares, donde el fallo de un componente puede poner en peligro vidas humanas y donde el mantenimiento es muy costoso.

El concepto de RCCB, como controlador de cargas en los sistemas de distribución de potencia, proporciona una mayor eficiencia al sistema de distribución con una menor pérdida por línea, un menor coste e incluso menor peso que los convencionales sistemas de distribución, constituidos a partir de relés y sistemas de protección.

Aunque permite el control remoto y por tanto mejora este punto frente a los CB y AFCB. Su uso se ve limitado de cara a sistemas más complejos como SDP de alta tensión.

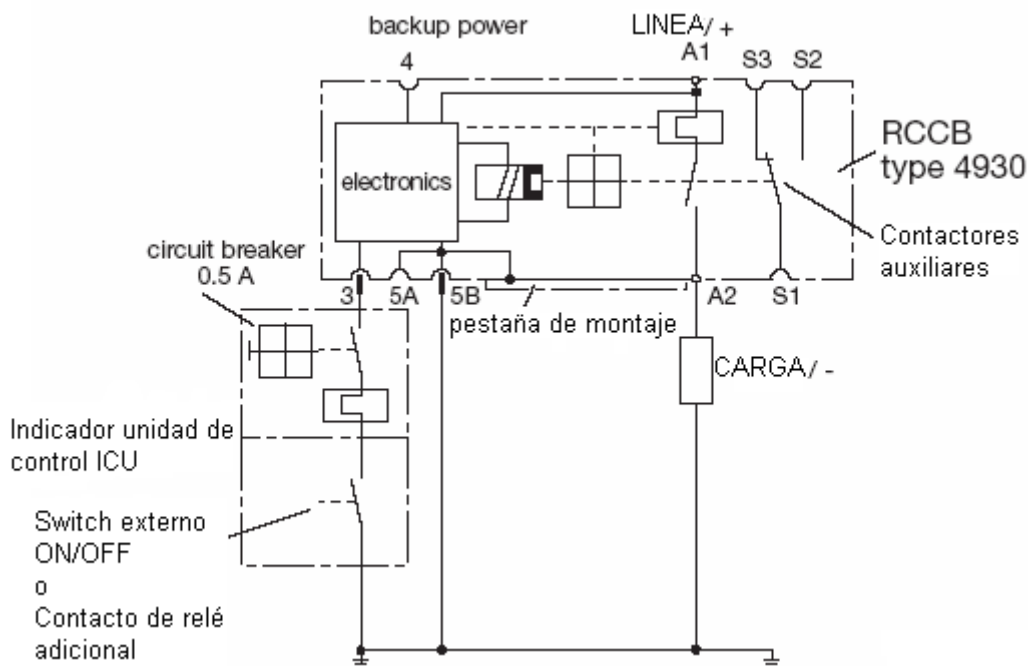


Figura 50. Diagrama de aplicación de un RCCB fabricado por E-T-A

5.2.4.5. Solid State Power Controller (SSPC)

Al igual que el RCCB, el Controlador de Potencia de Estado Sólido SSPC (ver Figura 51 [Izquierdo08_bis]) es un componente de reciente aplicación en comparación con el resto de dispositivos de protección. Este dispositivo está basado en semiconductores de potencia MOSFET o IGBT. El SSPC tiene la particularidad, frente al resto de dispositivos presentados, que combina la función de conmutar cargas al bus principal y la de proteger las instalaciones eléctricas de sobrecargas y cortocircuitos, mediante el uso de tecnología de estado sólido. Además, el SSPC puede proteger el cable con una curva I^2t , al igual que lo hace el CB. Otras características de los SSPC son: la alta fiabilidad, baja disipación de potencia y la capacidad de control remoto mediante el uso del software.

Los dispositivos basados en semiconductores de potencia, como son los SSPC, proporcionan una alta velocidad de respuesta y una menor susceptibilidad a las vibraciones que los dispositivos electromagnéticos y electromecánicos. Todas estas características y ventajas son consecuencia del desarrollo en los campos de la electrónica de potencia y la microelectrónica.



Figura 51. SSPC del fabricante DDC

Destacar que el uso de la tecnología de los SSPC permite un mejor control de los sistemas de distribución de potencia y mayor protección de los mazos de cables que los anteriores dispositivos electromagnéticos/electromecánicos. Debido a su pequeño tamaño es posible agruparlos en tarjetas o equipos formados por 8 ó 10 SSPC. Estas tarjetas/equipos se sitúan próximas a las cargas localizadas dentro de un área concreta del sistema embarcado, de forma que sólo se precisa de un cable principal para distribuir la potencia a una determinada zona del sistema embarcado. A partir de esta línea de potencia, de distribución primaria, los SSPC distribuyen la potencia eléctrica con cables más cortos y de menor galga a las cargas, ver Figura 52 [Izquierdo08].

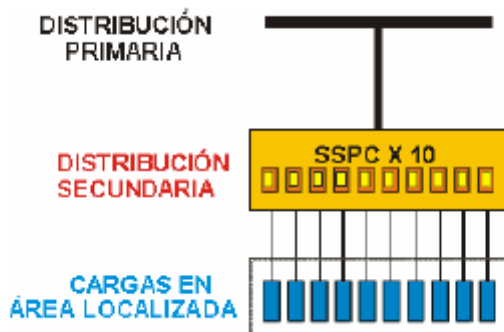


Figura 52. Módulo de 10 SSPC conectado al bus de distribución

De este modo, el diseñador de los SDP embarcados puede reducir la galga y el número de los cables utilizados, reduciendo peso y volumen en las instalaciones eléctricas embarcadas. Una distribución típica en aviones es la mostrada en la Figura 53 [Izquierdo08_bis].

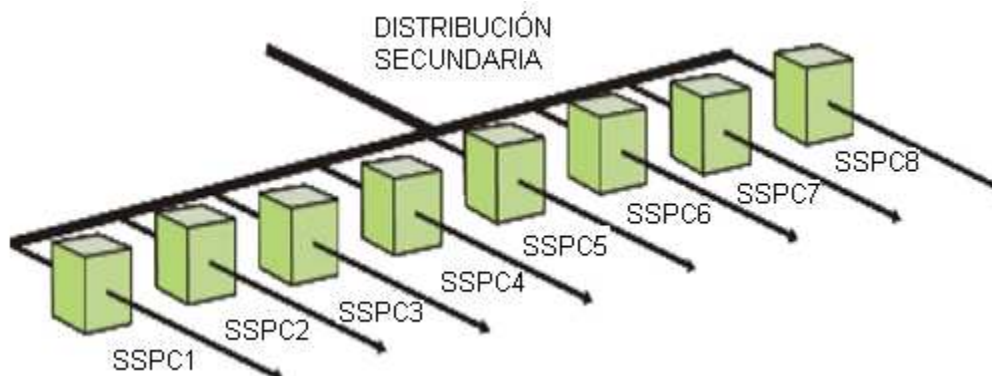


Figura 53. Esquema de disposición de los SSPC en el sistema de distribución del avión

Esta reducción en el peso y volumen (por la disminución del número de cables, su longitud y galga), resultan elementos clave para las grandes y complejas instalaciones eléctricas de nuevos aviones como el A380 y el B787. En estos aviones los SSPC ya han sido incluidos, lo cual ha permitido reducir el número total de componentes requeridos para la gestión de la potencia eléctrica y la protección de los sistemas de distribución.

En cuanto a los problemas que han surgido con los SSPC cabe destacar una publicación de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio NASA en la que se aseguraba que, si la curva I^2t , que sirve para proteger los dispositivos, tenía los umbrales muy altos, se dañaban los cables. Por otro lado, si se bajan dichos umbrales se corre el riesgo de que se produzcan falsas alarmas. También ha presentado fallos por las interferencias electromagnéticas (EMI).

Del modelado de los SSPC hay que tener en cuenta que antes de implementar el dispositivo hay que realizar un modelo que analice las compatibilidades del mismo con el resto de elementos del sistema, ya que los condensadores de los MOSFET crean problemas de inestabilidad.

La arquitectura interna de un SSPC con sistema de protección contra arcos eléctricos se muestra en la Figura 54 [Mussmacher04].

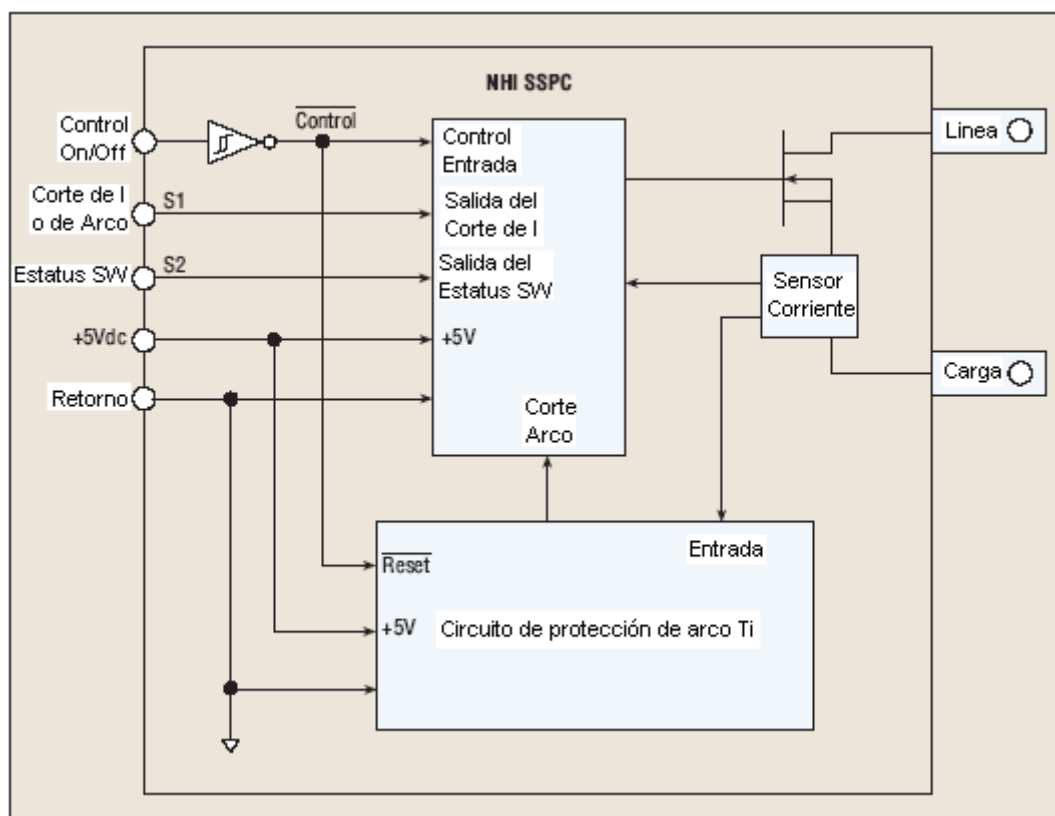


Figura 54. Arquitectura interna de un SSPC

Si nos centramos en las capacidades de los SSPC podemos decir que pueden disminuir las pérdidas de potencia, los picos de corriente/tensión en la conexión de cargas y que evitan que las cargas se suelten en los cambios de potencia de los buses de alimentación. Además son totalmente controlables remotamente, programables mediante software y presentan una triple protección del sistema eléctrico, consistente en la protección ante arcos eléctricos, protección térmica mediante la curva I^2t y protección ante sobrecargas y cortocircuitos. Son por lo tanto una buena opción para su instalación en los sistemas eléctricos embarcados.

5.2.4.6. SSPC con tecnología SiC

La tecnología de Si (MOSFET e IGBT) limita el rango de tensiones y corrientes en los cuales pueden ser aplicados. La temperatura máxima que pueden alcanzar está en torno a los 125°C. Comparado con el Si, el SiC ofrece menor resistencia específica cuando está conectado a altas tensiones y soporta hasta 200°C.

Un SSPC que emplea tecnología SiC [Xiaohuf08] puede soportar corrientes de hasta 30A a tensiones de 270V_{DC}.

En cuanto al control hay tres caminos que hacen que el dispositivo se desconecte. En primer lugar, ante sobrecorrientes superiores a diez veces la nominal, el corte es instantáneo. Otra protección actúa cuando se tienen sobrecorrientes superiores a la nominal pero sin llegar a superarla en diez veces su valor. Esta protección viene especificada por la curva I^2t . Por último el exceso de temperatura en el propio dispositivo (protección del SSPC).

Para poder trabajar con altas potencias se han usado experimentalmente [Xiaohu08] semiconductores del tipo SiC JFET. De esta forma se reduce el tamaño de los CB y mejora su complejo sistema de refrigeración. Este dispositivo en particular [Xiaohu08] no presenta protección específica ante arcos eléctricos.

5.2.4.7. Soluciones híbridas y complementos a los sistemas de protección

5.2.4.7.1. CB con Surge Arrestor

Para llegar a un compromiso entre el control de las sobrecorrientes y las sobretensiones en las faltas DC se propone [Fletcher08] la combinación de un CB con un surge arrestor (SA).

Un SA es un sistema de protección contra sobretensiones transitorias. Actúa disminuyendo rápidamente su impedancia interna cuando la tensión entre sus terminales sobrepasa un umbral. De esta forma crea un corto por el que evacua gran parte de la corriente (y la energía), protegiendo a los otros sistemas de la red. En condiciones normales tiene una impedancia muy elevada, que evita la conducción y fugas de corriente a través de él. Este tipo de dispositivos no están optimizados para su uso en aviones.

El SA emplea las curvas V/I mostradas en la Figura 55 [Fletcher08].

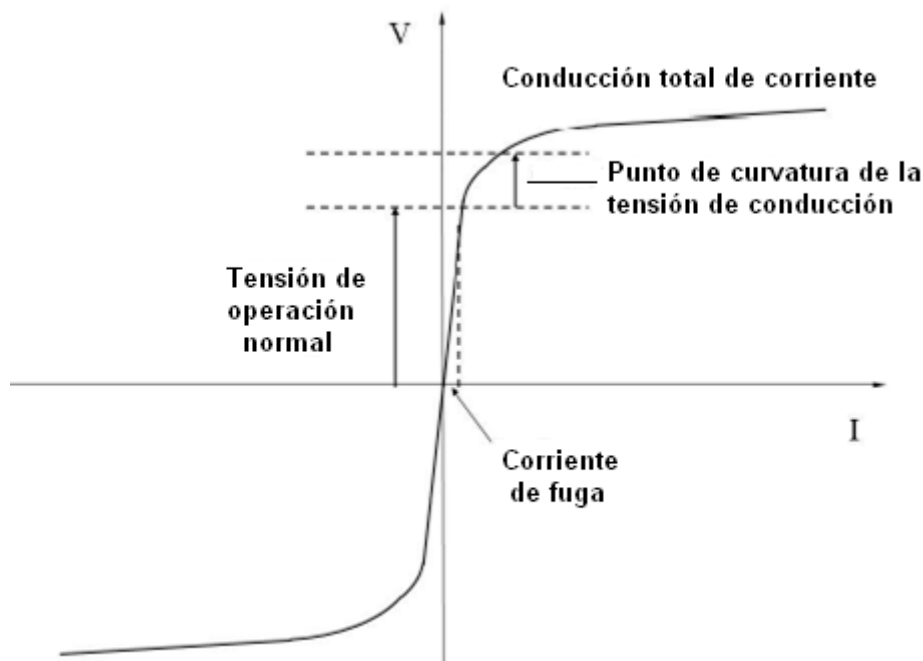


Figura 55. Curvas V/I de un Surge Arrestor

El dispositivo opera monitorizando la tensión de su propio terminal y ajusta el nivel de corriente mediante una fuente controladora, en función de los valores de las curvas características. Cuando se sobrepasa la tensión límite, la fuente controladora actúa dejando escapar a la corriente para disminuir la tensión. Los resultados obtenidos en su implementación en el laboratorio [Fletcher08] nos indican que el empleo de un dispositivo de protección de sobretensiones como el SA, en combinación con un CB que actúa en un tiempo adecuado, mejora las características de protección de los CB.

Sin embargo, con la tecnología de corriente (SA) es muy difícil reducir más la tensión, ya que para hacerlo se tendrían corrientes poco deseables. Por este motivo no se han implementado en aviones.

5.2.4.7.2. Smart Panel

Los sistemas de protección tradicionales en los aviones contienen CB térmicos y conmutadores. Las mejoras en los microprocesadores han impulsado el avance de nuevos tipos de interruptores.

El Smart Panel es un complemento que permite la monitorización y control de los CB del avión de forma centralizada y sencilla.

Algunas de las ventajas que presenta la instalación de CB con Smart Panel son [Potter08]:

- Minimiza el tiempo de instalación de las actualizaciones.
- Disminuye el peso en el avión y el trabajo de instalación.
- Permite la eliminación de relés electromecánicos.
- Tiene una interfaz directa de los interruptores de estado sólido para la tripulación. Así se minimiza la necesidad de integración de sistemas en el avión y el nuevo aprendizaje de los pilotos.
- Se puede reconfigurar fácilmente, para adaptarse a los distintos tipos de interruptores.
- Admite muchos interruptores por unidad de volumen.
- Tiene funciones lógicas y de control.
- Soporta condiciones de turbulencia o mucha vibración.
- Soporta futuras implementaciones y nuevos sensores.

Algunas de las posibles interfaces luminosas que puede presentar este dispositivo para mostrar el estado de los interruptores se aprecian en la Figura 56 y Figura 57 [Potter08].

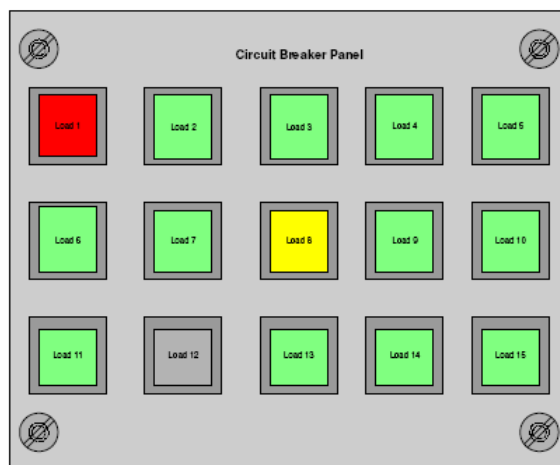


Figura 56. Posible configuración del Smart Panel (1)

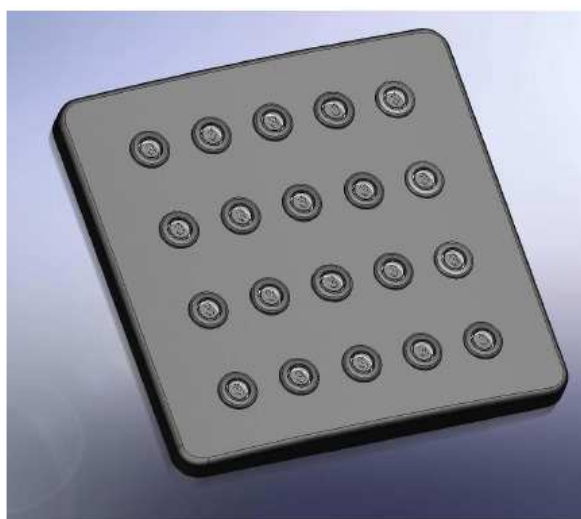


Figura 57. Posible configuración del Smart Panel (2)

Como sólo se trata de un complemento para los dispositivos de protección y no de un dispositivo en sí mismo no se va a profundizar más en este trabajo. Para mayor información al respecto se recomienda ver la referencia [Potter08].

5.2.4.7.3. SSTDR ASIC

El Sistema Integrado Específico de Aplicación de la tecnología Spread Spectrum Time Domain Reflectometry (SSTDR ASIC) es un producto creado para la localización de faltas, tanto intermitentes como estáticas que se encuentra ahora mismo en desarrollo.

Las faltas intermitentes en cables son las más frustrantes, las que más tiempo hacen perder y las más caras a la hora de su detección en los sistemas eléctricos. Este tipo de faltas se producen cuando el ambiente es húmedo, cuando hay vibración, bajo presión o en ciertas configuraciones del sistema durante el funcionamiento. El mejor y prácticamente el único momento para detectar estas faltas es cuando el cable dañado está en funcionamiento. La

tecnología capaz de detectar estas faltas con el cable conectado es la SSTDR (Spread Spectrum Time Domain Reflectometry). Con esta tecnología se inyecta un pseudo-ruido que permite una lectura de las condiciones del sistema. Cuando se produce una falta intermitente la tecnología SSTDR la detecta y localiza. No mide variaciones en la tensión o la corriente si no la impedancia en el sistema de cableado, por lo que es complementaria con los sistemas para detección de arco empleados por otros AFCB. Es bastante inmune a interferencias electromagnéticas y ruidos provocados por los cambios de cargas. Toda esta tecnología ha sido implementada en el Sistema Integrado Específico de Aplicación ASIC.

La mayoría de las faltas se producen por el roce de los cables, que producen cortocircuitos. Este tipo de falta suele ser intermitente, debido a las vibraciones que hacen que el cable rozado toque a la estructura del avión o a otro cable, dando lugar a “arcos secos”. Otra causa puede ser la intrusión de humedad, por lo que tendremos un “arco húmedo”. ASIC es capaz de detectar tanto los cortocircuitos (húmedos y secos), como los circuitos abiertos.

- Tecnología empleada: SSTDR

Hoy en día hay muchos métodos de detección de faltas están basados en la reflectometría (TDR, FDR, SWR...), ver apartado 5.2.3.1. Estos métodos mandan una señal de alta frecuencia por el cable y evalúan la señal de regreso para determinar posibles faltas, rozaduras... El tiempo de retraso entre el momento en el que se envía la señal y el momento en el que vuelve determina la posición del cambio de impedancia. Cada tipo de técnica emplea diferentes ondas y sensores. Todos estos métodos son capaces de detectar faltas estáticas (que se están produciendo en el momento en el que se está midiendo). Debido a que en el avión el entorno es muy dinámico (vibraciones, humedades, cambios de presión...) no es posible realizar en tierra ensayos con las mismas condiciones que durante el vuelo. Los métodos que son capaces de detectar estos fallos durante el vuelo están emergiendo. La detección de la falta durante el vuelo significa que va a poder ser reparada en tierra por los equipos de mantenimiento de forma rápida y precisa. S/SSTDR, MCR y NDR pueden usarse durante el vuelo, pero S/SSTDR es la que más se ha desarrollado. Se ha demostrado que la tecnología S/SSTDR es capaz de detectar tanto circuitos abiertos como cortocircuitos (húmedos y secos) con una precisión de ± 1.5 pies en cables de 100pies. La Figura 58 [Smith08] muestra cómo es la señal cuando se produce un corto o un circuito abierto a 80pies.

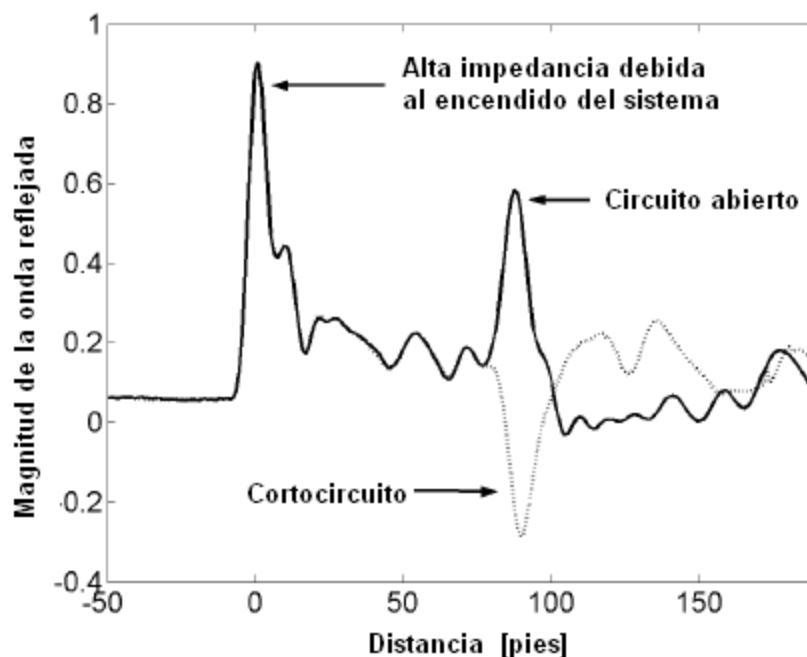


Figura 58. Respuesta del STDR ante falta en el cable a 80 pies

El primer pico (a 0pies) se corresponde con la conexión del circuito al cable, lo cual supone un fuerte aumento de la impedancia. El valor del pico indica la magnitud de la falta.

S/SSTDR ha sido probado para redes de 60Hz y 400Hz [Smith08]. Asimismo cumple con múltiples estándares.

Esta tecnología se ha implementado en varias versiones del prototipo Wire In-Line Maintenance Aim (WILMA). Se puede ver el modelo en la Figura 59 [Smith08].



Figura 59. Prototipo WILMA S/SSTDR

Este prototipo está pensado para empleo y toma de datos en cada vuelo, con una batería que le da una autonomía de 6 a 8 horas.

- Desarrollo del ASIC

Es muy deseable que este tipo de tecnología esté presente en el avión de forma permanente en ciertos puntos críticos. Para ello se ha desarrollado el ASIC que reduce el tamaño del anterior prototipo, véase la Figura 60 [Smith08].



Figura 60. Comparación del tamaño del ASIC

El ASIC tiene las mismas características de detección y localización que el anterior modelo. Este modelo en particular puede ser construido en un AFCB para ofrecer al mismo tiempo protección ante arco y localización de faltas, en una solución única integrada.

Por lo tanto, gracias al desarrollo del sistema mixto S/SSTDR se puede monitorizar el estado del cableado de forma continua, con el fin de detectar y localizar tanto faltas intermitentes como estáticas. Su uso conjunto con los sistemas de protección mejora la fiabilidad del sistema y disminuye los tiempos y esfuerzos a la hora de realizar el mantenimiento en tierra del avión.

5.2.4.7.4. Método de Control de Interrupción de Falta (CIF).

Se ha desarrollado un método [Thomas07] para sincronizar los comandos de activación de un CB de alta tensión y así conseguir preseleccionar los tiempos de arco incluso ante faltas asimétricas. Se emplea un algoritmo para detectar los parámetros de la falta. Se hace un análisis de la varianza para conseguir un mejor control y la base para una diferenciación entre faltas a tierra y no a tierra. También se ha estudiado la estabilidad de los CB SF₆ de alto tensión [Thomas07].

Estos CB son para AC y cortan la corriente cuando ésta pasa por cero. De esta manera, si conseguimos sincronizar la apertura del circuito con el momento en el que la corriente AC pasa por cero el tiempo de arco será el mínimo.

Este tipo de control de interrupción de falta (CIF) se diferencia de las interrupciones directas en que en el caso de las directas se interrumpe la corriente en cuanto se da una señal de activación de la protección. En el caso del CIF una vez recibida la señal de protección se espera a que la corriente pase por su valor cero para abrir el circuito.

Para que un CIF sea viable deben cumplirse varios requisitos:

- Determinación de los momentos en los que la corriente es cero con cierta precisión ($\pm 0.5\text{ms}$).
- Conocimiento del tiempo de apertura del CB y de su estabilidad.
- Conocimiento del tiempo mínimo de arco del CB y de su estabilidad.

El primer requisito depende del algoritmo empleado y los dos últimos de las características del CB.

Algunas complicaciones adicionales de los CIF son:

- El carácter aleatorio con el que se producen las faltas.
- En el comportamiento de las corrientes transitorias asimétricas, los pasos por cero no son periódicos.
- El comportamiento de la corriente en la interrupción es diferente en función de si la falta es a tierra o de fase.

En la Figura 61 [Thomas07] se muestra un diagrama de flujo simplificado del proceso seguido en el CIF.

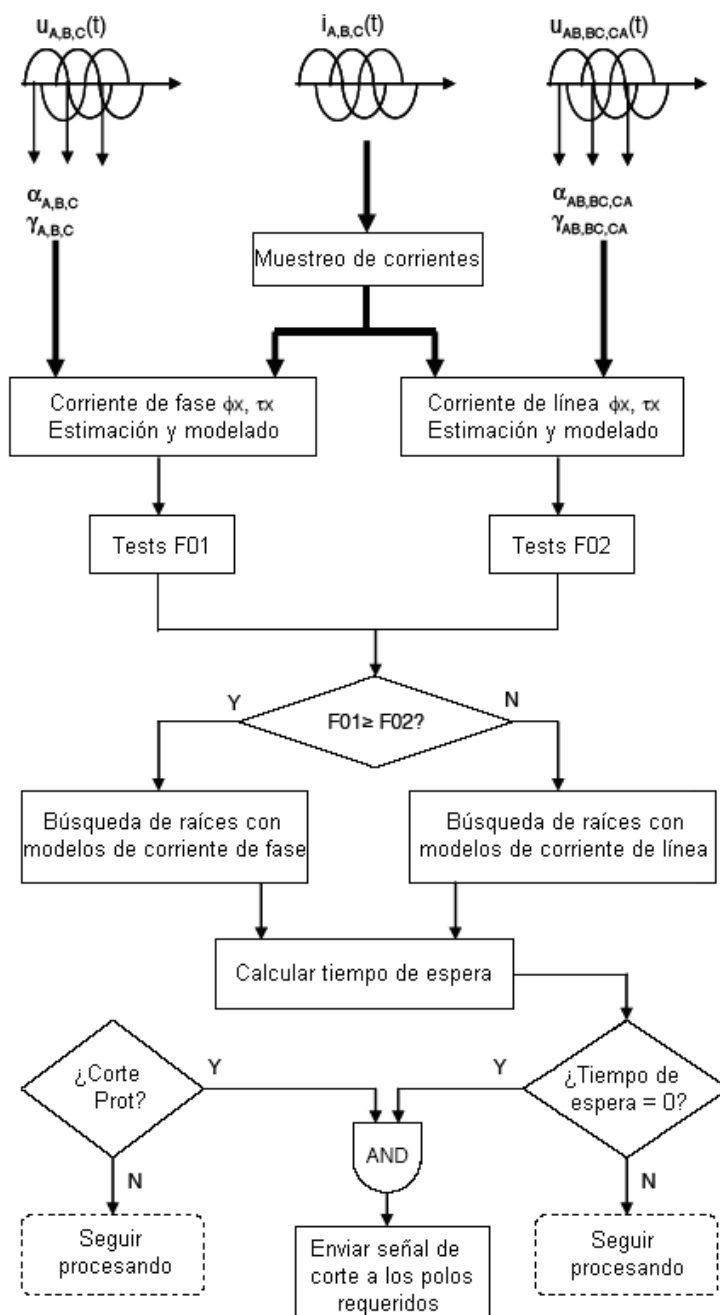


Figura 61. Diagrama de flujo del proceso de un CIF

El algoritmo es capaz de estimar los puntos en los que la corriente pasa por cero con un margen de error de $\pm 0.5\text{ms}$ con condiciones de falta asimétrica. Los resultados experimentales confirman la alta estabilidad del sistema en cuanto a los tiempos mínimos de arco, incluso cuando la energía empleada es baja. Esto demuestra la mejora de los CB con el sistema CIF. El inconveniente de este método es que se emplea sólo con tensiones alternas (AC), mientras que la tensión en los nuevos sistemas de distribución de potencia de los aviones más eléctricos será fundamentalmente continua.

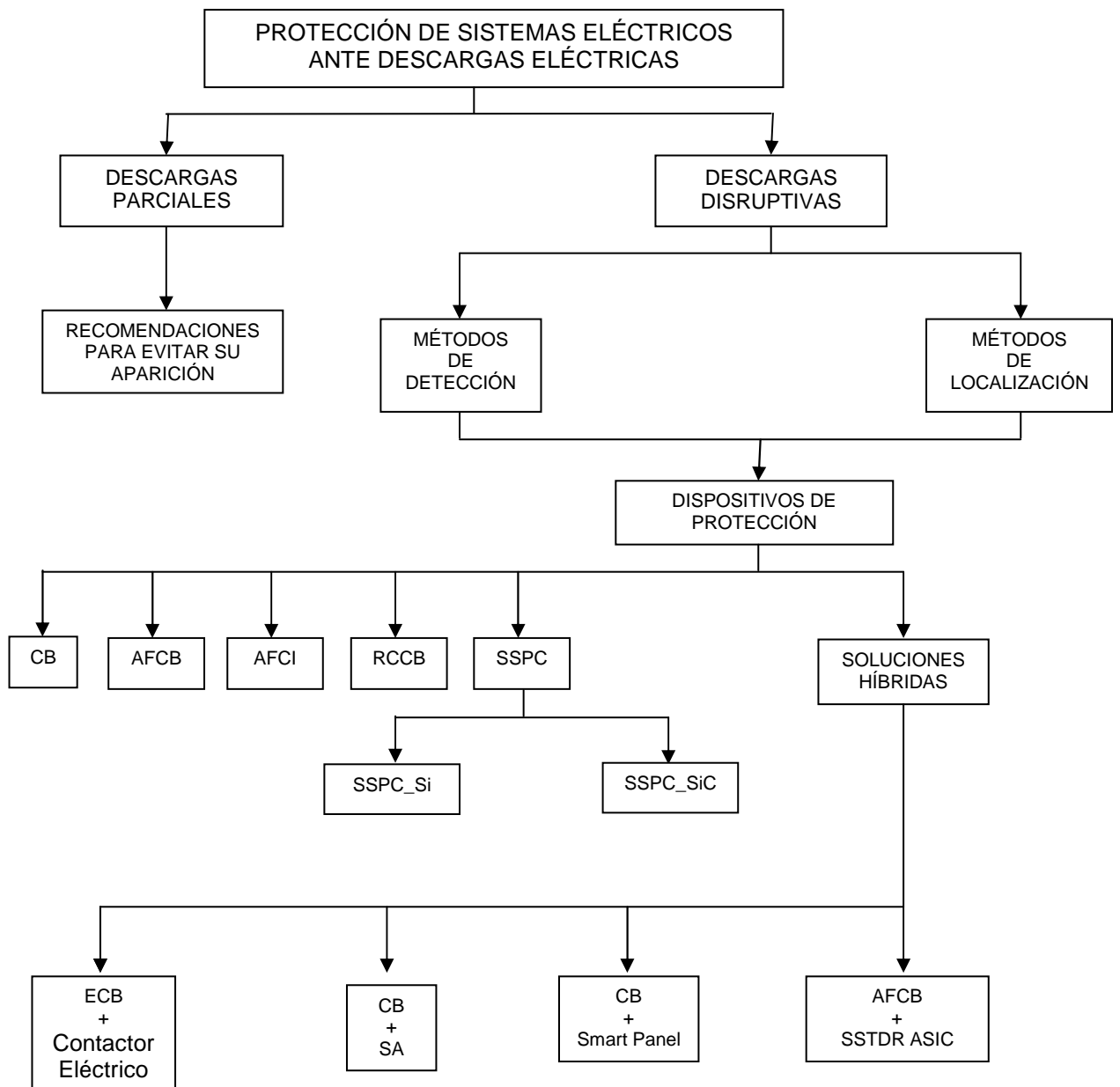
5.2.4.7.5. CB electrónico con contactor eléctrico

Para aplicaciones con alta tensión continua los CB convencionales necesitan grandes entrehierros, un sofisticado sistema de extinción del arco y tecnologías de alto coste como el vacío o el llenado con gases aislantes. Los CB electrónicos (ECB), o controladores de estado sólido, reúnen los requerimientos de tamaño y prestaciones, pero aún así precisan de un contactor eléctrico para mejorar su aislamiento.

En los controladores de estado sólido la caída de tensión es mayor y precisan de un disipador de calor por las pérdidas de potencia, que normalmente necesita más espacio que el propio semiconductor. Un controlador de estado sólido en abierto (OFF) permite que una pequeña corriente de fuga lo atraviese. Los valores permitidos de fábrica permiten hasta un máximo de 10mA, dependiendo de la temperatura [Meckler04]. Es por esto que la protección en OFF no es tan efectiva como en los CB mecánicos, con entrehierro de aire. La caída de tensión en los contactores eléctricos es mucho menor que en los de estado sólido. Los controladores de estado sólido son superiores en prestaciones a los mecánicos para altas tensiones.

Con el fin de suplir la carencia de aislamiento físico de los controladores de estado sólido se ha propuesto un sistema que pone en serie un interruptor mecánico que estará abierto cuando el dispositivo esté en OFF, proporcionando un aislamiento mejorado. Esta configuración es muy apropiada para alta tensión y los contactores del interruptor mecánico no sufren casi abrasión debido a que se operan cuando las corrientes son pequeñas, esto es, para pasar de estado ON a OFF primero se desconecta el controlador de estado sólido y después el contactor. Para pasar de OFF a ON se conecta primero el contactor y después el controlador.

CAPÍTULO 5. PROTECCIÓN ACTUAL DE SISTEMAS ELÉCTRICOS EMBARCADOS ANTE DESCARGAS ELÉCTRICAS



CAPÍTULO VI:
CONCLUSIONES
E
INVESTIGACIONES FUTURAS

6. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

En este trabajo se ha mostrado la problemática que suponen las descargas eléctricas en los sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados. Se han explicado los fundamentos físicos que rigen el comportamiento de las descargas eléctricas, así como los efectos que producen y las protecciones que sobre este fenómeno han sido desarrolladas y se encuentran actualmente en el mercado.

6.1. PAUTAS GENERALES PARA LA PROTECCIÓN ANTE DESCARGAS ELÉCTRICAS

Como ya se ha visto a lo largo de este trabajo las descargas eléctricas pueden ser disruptivas o parciales, en función de si atraviesan por completo el aislante que separa dos conductores con diferente potencial o no.

Las descargas parciales, ver capítulo 3, se producen generalmente en aislantes gaseosos y ante tensiones menores de las que se precisan para que se formen las descargas disruptivas. Son más difíciles de detectar y tratar debido a que se suelen dar en las burbujas de gas de los aislantes sólidos. Los efectos que producen sobre el sistema eléctrico son principalmente la degradación del aislante sólido, con la consecuente disminución de la fiabilidad y vida útil del sistema de protección; interferencias en los sistemas de comunicación y pérdidas de carga.

Las descargas disruptivas o arcos eléctricos, ver capítulo 0, se producen cuando la energía aplicada es suficiente para hacer circular la corriente eléctrica atravesando por completo el aislante. La resistencia dieléctrica de los aislantes sólidos es mayor que la de los líquidos y ésta a su vez mayor que la de los gaseosos. Es por tanto razonable tratar de diseñar los sistemas de protección en base a este último tipo de aislantes. Para ello se emplea la Ley de Paschen, ver apartado 4.3, que permite conocer la tensión a la cual se producirá una descarga disruptiva en un aislante gaseoso en función de la presión atmosférica del mismo y de la separación existente entre los conductores. Los efectos de este tipo de descarga son mucho más perjudiciales que los de las descargas parciales. Entre los más relevantes destaca la alta posibilidad de crear fuego debido a las grandes cantidades de energía que se liberan en el proceso.

En cuanto a los procesos físicos que participan en la formación de las descargas eléctricas, ver capítulo 2, se puede concluir que la descarga se produce cuando se consigue que el aislante pierda dicha propiedad, es decir, deje de oponerse al paso de la corriente. Para ello se han formalizado dos teorías que explican el proceso. La primera de ellas es conocida como el mecanismo de descarga de Townsend. Según Townsend, partiendo de un electrón libre presente en el aislante, si la energía que se le aplica a dicho electrón (generalmente en forma de campo eléctrico) es suficiente para que el electrón ionice a un átomo del aislante al chocar con él, liberará a otro electrón y comenzará el proceso de descarga. Para que se produzca la descarga

completa se tiene que dar un aporte extra de electrones desde el cátodo para que se produzca la avalancha electrónica que forma la descarga.

El segundo mecanismo es conocido con el nombre de Canales. En este caso el tiempo de formación de la descarga es menor ya que la agrupación de las partículas cargadas da lugar a una distorsión del campo eléctrico aplicado. Siempre que la cantidad de portadores de carga supere un valor crítico, se crearán unos caminos o canales de baja resistencia entre los conductores. Es por esos caminos por donde discurre la corriente de la descarga eléctrica.

Teniendo todo esto en cuenta podemos marcar una serie de consideraciones generales a tener en cuenta a la hora de diseñar un sistema eléctrico de forma segura.

- A la hora de elegir el tipo de aislante hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea su resistencia dieléctrica, mayor será su rango de protección. También hay que tratar de emplear aislantes con poca variación entre sus constantes dieléctricas. Será muy importante que el proceso de fabricación sea adecuado, para que no se formen burbujas de gas en los aislantes.
- Hay que evitar en la medida de lo posible las vibraciones en los sistemas eléctricos, ya que pueden aflojar las interconexiones entre dispositivos así como variar la distancia de separación entre conductores, dando lugar a situaciones de riesgo de descarga. Dadas las características específicas de las plataformas aeronáuticas, donde las vibraciones son inevitables, habrá que centrarse en una correcta sujeción de los dispositivos del sistema eléctrico.
- Debe evitarse también en la medida de lo posible la intrusión de elementos contaminantes (como partículas de polvo, gases, etc.) en el sistema eléctrico, ya que como se ha visto en capítulos anteriores propician la aparición de descargas eléctricas.
- Si se va a trabajar bajo presiones altas será más deseable que la polaridad entre los conductores sea positiva, mientras que si se sabe que se trabajará con presiones bajas lo mejor es emplear una polaridad negativa.
- En la medida de lo posible hay que tratar de evitar los campos eléctricos no uniformes, ya que son propicios para la aparición de descargas parciales.
- Como norma general se debe intentar controlar la temperatura de los aislantes, ya que a mayor temperatura la protección que éstos ofrezcan ante descargas eléctricas será menor.

6.2. CAMPOS DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS

Dadas las características de los dispositivos de protección, explicadas en el capítulo 5, se puede establecer una guía de los más apropiados para cada entorno de aplicación en los sistemas de distribución de potencia de los aviones:

- Los CB serán reemplazados por los AFCB ya que estos últimos añaden la protección frente a arcos y faltas intermitentes a las prestaciones de los CB. Se podrán emplear para proteger los cables que no sean de alta tensión, como por ejemplo los cables de potencia auxiliar de los equipos.
- En función del papel que deba desempeñar el dispositivo de protección y del coste que se esté dispuesto a asumir se pueden considerar los RCCB, para poder realizar la apertura/cierre del circuito de forma remota, siempre que no se emplee alta tensión.
- El dispositivo más cercano a las cargas, dada su gran capacidad de monitorización y control remoto, así como su gran fiabilidad y nivel de protección ante sobrecargas, sobrecorrientes y arcos debería ser el SSPC. Cuando el nivel de corriente requerido sea alto sería mejor emplear el SSPC con tecnología de SiC, que soporta hasta 30A a 270V_{DC}. De momento no es posible ya que estos dispositivos están en desarrollo y no se comercializan.
- Una opción a tener en cuenta siempre que se emplee un dispositivo de protección electrónico es la de poner en serie al dispositivo un contactor eléctrico. Esta configuración mejora el aislamiento cuando el circuito debe estar abierto, ya que el dispositivo electrónico siempre permite unas pequeñas corrientes de fuga. Además puede ser ventajoso en cuanto al volumen requerido porque gracias a esta combinación no se precisan grandes sistemas de refrigeración para la disipación del calor. Esto es gracias a que con la correcta operación de los dos dispositivos se disminuyen las pérdidas y con ello se reduce la temperatura. El inconveniente puede ser el aumento de peso que supone el colocar dos dispositivos en lugar de uno.
- Para mejorar las tareas de mantenimiento sería recomendable la introducción de los dispositivos SSTDR ASIC, junto con los otros sistemas de protección, en el sistema eléctrico del avión. Además de ser dispositivos de poco tamaño, permiten la detección y localización de las faltas que se han producido durante el vuelo.

6.3. INVESTIGACIONES FUTURAS

En lo referente a las futuras investigaciones en este campo de la protección de los sistemas eléctricos de alta tensión en continua (HVDC) se deben focalizar los esfuerzos en la mejora de los límites de funcionamiento de los SSPC, que tienen limitaciones para altas corrientes.

Hay que buscar sistemas de detección y localización de arcos, descargas parciales e intermitentes más precisos, fiables y capaces de monitorizarse. Se deben mejorar también los sistemas de predicción.

Las faltas intermitentes son las más difíciles de medir y localizar. Cuando se consigan diferenciar de los transitorios producidos por el funcionamiento normal del avión, se conseguirá un sistema completamente fiable en la detección de faltas. En este camino se está estudiando modelar los transitorios ocurridos por las operaciones normales para, a partir de estos modelos, poder saber con seguridad cuando se ha producido una descarga eléctrica.

Las características que debe poseer un sistema de protección eléctrico son:

- Debe ser capaz de detectar y localizar cuándo y dónde se ha producido una descarga eléctrica, para poder actuar en consecuencia.
- Efectividad: debe ser preciso y detectar todas las faltas, sin ninguna falsa alarma ni faltas sin detectar. También debe ser capaz de diferenciar entre el tipo de descarga que se ha producido así como del riesgo que entraña dicha falta.
- No intrusivo: el sistema no debe interferir en las señales originales de los cables.
- Tiempo real: debe ser un sistema on-line.
- Bajo coste: con bajo peso computacional.
- Controlable y monitorizable.

El mejor conocimiento de las leyes físicas que siguen las descargas, sobre todo en lo referente a las descargas parciales, nos ayudará a optimizar los parámetros de seguridad establecidos en el SDP y así poder disminuir el coste del sistema. También favorecerá el ajuste de los planes de mantenimiento y el desarrollo de nuevos, más precisos y fiables dispositivos de protección y detección.

Algunas partes de los fundamentos físicos son conjeturas basadas en resultados experimentales, por lo que las tareas que todavía hay que seguir desarrollando son:

- Confirmar y caracterizar todos los tipos de descargas.
- Determinar el comportamiento de las descargas ante su extinción y precisar el tiempo de duración.
- Dado que hay cables sujetos a procesos de rozadura, que deterioran el aislante disminuyendo su vida útil, se debe estudiar la relación entre la forma de la rozadura del cable y la forma de onda que produce la descarga, para poder tener más conocimiento del daño producido.

- Estudiar el comportamiento de las ondas, tanto de descargas parciales como de arcos, al propagarse por el sistema y verificarlo mediante un modelo simulado.
- Crear medidas específicas para tratar cada tipo de fallo en los cables.
- Estudiar y confirmar los ciclos de vida de un cable con rozadura, bajo condiciones controladas.
- Desarrollar métodos que estimen el tiempo de vida del sistema y de sus componentes.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

- [Agustín00] AGUSTÍN D; *Diccionario de Ciencias*. Edición ilustrada. Publicado por Editorial Complutense, 2000. Páginas 367-368 de 1126.
- [Albert72] ALBERT, A.; FERNANDEZ, J.; *Electrónica y dispositivos electrónicos*. Publicado por Reverte, 1972. Páginas: 602.
- [Alonso98] ALONSO G, et al; *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*. Publicado por Marcombo, 1998. Páginas 92-95 de 368.
- [Balcells92] BALCELLS J, et al; *Interferencias electromagnéticas en sistemas electrónicos*. Edición ilustrada. Publicado por Marcombo, 1992. Páginas: 428.
- [Burbano03] BURBANO S, GARCÍA C; *Física general*. Edición 32 ilustrada. Publicado por Editorial Tebar, 2003. Páginas 800.
- [Ching-Tsai07] CHING-TSAI PAN; YI-HUNG LIAO; *Modeling and Coordinate Control of Circulating Currents in Parallel Three-Phase Boost Rectifiers*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 54, Issue 2, April 2007
Páginas: 825 – 838.
- [Cotton07] COTTON, I.; “Higher Voltage Systems For The More Electric Aircraft.” En: *Insulation Design and Testing Tutorial*. National Grid Senior Lecturer. (2007).
Páginas: 84.
- [Cotton08] COTTON, I.; NELMS, A.; *Higher Voltage Aircraft Power Systems*. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE Volume 23, Issue 2, Feb. 2008
Páginas:25-32
- [Davidovich81] DAVIDOVICH L; LIFSHIT E; *Teoría clásica de los campos*. 2ª Edición. Publicado por Reverte, 1981. Páginas: 525.
- [Dios98] DIOS F, et al; *Campos electromagnéticos*. Edición ilustrada. Publicado por Edicions UPC, 1998. Páginas: 474. Digital Object Identifier 10.1109/MAES.2008.4460728

- [Dixon89] DIXON, J.W. Ooi, B.T.; *Series and parallel operation of hysteresis current-controlled PWM rectifiers* Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 25, Issue 4, July-Aug. 1989 Páginas: 644 – 651
- [Donner08] DONNER, G.; KIMBLIN, C.; An introduction to IEEE Std 1458™-2005 “recommended practice for the selection, field testing, and life expectancy of molded case circuit breakers for industrial applications. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2008. ICPS 2008. IEEE/IAS 4-8 May 2008. Páginas: 1 – 4. Digital Object Identifier 10.1109/ICPS.2008.4606280
- [Dunbar72] DUNBAR, W.G.; *High Voltage Design Criteria*. The Boeing Company Agosto. 1972. Pages: 103. Descargado de la página web: http://www.everyspec.com/NASA/NASA+-MSFC/MSFC-STD/MSFC-STD-531-HIGH_VOLTAGE_DESIGN_CRITERIA_SUPERSEDED_ES_50M05189_2631/. Con nombre identificador: MSFC-STD-531, HIGH VOLTAGE DESIGN CRITERIA
- [Dunnbarg80] DUNNBARG, W.; “Cables and Connectors for Large Space System Structures (LSST)”. En: *Grounding/Bonding and Data Power Distribution Connectors and Cables for Large Space System Technology*. Abril 1980. BOEING AEROSPACE COMPANY. Contract NAS8-33432. Páginas: 104.
- [Fletcher08] FLETCHER, S.D.A. et al; *Evaluation of Overvoltage Protection Requirements for a DC UAV Electrical Network*. 2008. Páginas: 10 Contacto: Steven Fletcher, Research Student University of Strathclyde, UK. sfletcher@eee.strath.ac.uk.
- [Giancoli06] GIANCOLI D, CAMPOS V; *Física: Principios con aplicaciones*. 6ª Edición. Publicado por Pearson Educación, 2006. Páginas: 739
- [Guangiun08] GUANGIUN LIU, et al; *A Survey on Arc Fault Detection and Wire Fault Location for Aircraft Wiring Systems*. 2008. Páginas: 12. Descargado de la página web: <http://saeaero.saejournals.org/content/1/1/903.abstract>

- [Hall00] HALL K, D., et al; "Electrical Auxiliary Power Unit (EAPU) Corona Design Guideline". *En: Space Transportation System Orbiter Upgrades Program*. Junio del 2000. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Número de documento: JSC-29129. Páginas: 41.
- [Handt08] HANDT, K.; GRIEPENTROG, G.; MAIER, R.; *Intelligent, compact and robust semiconductor circuit breaker based on silicon carbide devices*. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE 15-19 June 2008. Páginas: 1586 – 1591. Digital Object Identifier 10.1109/PESC.2008.4592166
- [Haq95] HAQ A., Q.; DAYTON A, J. Jr.; *Insulation Requirements of High-Voltage Power Systems in Future Spacecraft*. 1995. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Lewis Research Center. Cleveland, Ohio 44135. Páginas: 15.
- [Hlawiczka77] HLAWICZKA, P; *Introducción a la electrónica cuántica*. 1ª Edición. Publicado por Reverte, 1977. Páginas: 491.
- [Izaurieta07] IZAURIETA F; Doctor en Ciencias Físicas, año 2007. Profesor del Dpto. de Matemáticas y Física Aplicadas de la Facultad de Ingeniería de la UCSC. Página web consultada: <http://fis2201.blogspot.com/2009/04/parte-6-voltaje.html>
- [Izquierdo08] IZQUIERDO GIL, D.; BARRADO BAUTISTA, A. (tutor); *Análisis y modelado de un controlador de potencia de estado sólido (SSPC) para su aplicación en sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados*. Doctorado en ingeniería eléctrica, electrónica y automática. Trabajo de investigación (Programa de doctorado IEEA). Universidad Carlos III de Madrid. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Tecnología Electrónica. Febrero 2008. Páginas: 47.
- [Izquierdo08_bis] IZQUIERDO, D. et al; *Protection devices for aircraft electrical power distribution systems: a survey*. [Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE](#) 10-13 Nov. 2008 Page(s): 903 - 908 Digital Object Identifier 10.1109/IECON.2008.4758073 2008.

- [Kuffel00] KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S.; KUFFEL, J.; *High Voltage Engineering Fundamentals*. 2ª Edición. Publicado por Butterworth-Heinemann. Año 2000. Páginas: 539
- [Landau01] LANDAU L. D. et al; *Curso de física teórica*. Edición ilustrada. Publicado por Reverte, 1901. Páginas 597.
- [Linzey05] LINZEY, W. et al; *Evaluation of risk and possible mitigation schemes for previously unidentified hazards*. 9th Joint FAA/DoD/NASA 2006 Aging Aircraft Conference March 6-9, 2006. Páginas: 28.
- [Llinares97] LLINARES J, PAGE A; *Curso de Física Aplicada - Electromagnetismo Y Semiconductores* -. Publicado por Ed. Univ. Politéc. Valencia, 1997. Páginas: 720.
- [Meckler04] MECKLER, P.; HO, W.; *Does an electronic circuit breaker need electrical contacts?* Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts 2004. Páginas:480 – 487. Digital Object Identifier 10.1109/HOLM.2004.1353160
- [Mitolo07] MITOLO, M.; *Shock Hazard in the Presence of Protective Residual Current Devices*. Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2007. ICPS 2007. IEEE/IAS 6-11 May 2007. Páginas:1 – 6. Digital Object Identifier 10.1109/ICPS.2007.4292108
- [Mussmacher04] MUSSMACHER K; “*Controler Guard Against Arc Faults*”. Power Electronics Technology. Noviembre de 2004. Páginas 5. Descargado de la página web: <http://powerelectronics.com/mag/411pet25.pdf>
- [Oppenheim98] OPPENHEIM A et al; *Señales y sistemas*. 2ª Edición ilustrada. Publicado por Pearson Educación, 1998. Páginas 956.
- [Ortega96] ORTEGA ARAMBURU X, JORBA BISBAL J; *Radiaciones ionizantes I: Utilización y riesgos*. 2ª Edición. Publicado por Edicions UPC, 1996. Páginas: 479.
- [Papoulis85] PAPOULIS A; *Sistemas digitales y analógicos, transformadas de Fourier, estimación*. 2ª Edición. Publicado por Marcombo, 1985. Páginas 324.

- [Pappas01] PAPPAS R, et al; “*Arc Fault Circuit Breaker Development and Implementation*”. Conferencia 2001. Páginas 9. <http://www.fire.tc.faa.gov/2001Conference/files/FireProtection/RPappasPAPER.PDF>
- [Paschen89] PASCHEN F, Article: “*Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz*”. *Annalen der Physik*. Volume 273 Issue 5, Pages 69-96
- [Pedrow96] PEDROW P, OLSEN R.; *Corona streamer onset as an optimization criterion for design of high voltage hardware on transmission lines*. Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Quebec, Canada, June 16-19,1996. Páginas 312-315.
- [Plaza00] PLAZA FERNÁNDEZ, M.; *Electricidad en los aviones*. 5ª Edición. Ed. Paraninfo, 2000. Madrid, España. Páginas: 192.
- [Plonus94] PLONUS M; *Electromagnetismo aplicado*. Publicado por Reverte, 1994. Páginas 750
- [Potter08] POTTER, F.; BALLAS, M.; SUPPLES,T.; “*Smart Panel*” *Electronic Circuit Breaker Control Technology*. 2008. Páginas: 9. Descargado de la página web: <http://www.sae.org/technical/papers/2008-01-2880>
- [Quing95] QING CHEN; *Stability Analysis of Paralleled Rectifier Systems*. Telecommunications Energy Conference, 1995. INTELEC '95., 17th International 29 Oct.-1 Nov. 1995 Páginas: 35 - 40 Digital Object Identifier 10.1109/INTLEC.1995.498926- (1995)
- [Sato93] SATO, Y.; SUZUKI, K.; AZEDDINE, D.; KATAOKA, T.; *A new control strategy to improve AC input current waveform of high-power parallel connected PWM rectifiers*. Power Conversion Conference, 1993. Yokohama 1993., Conference Record of the 19-21 April 1993 Páginas: 129 – 134
- [Schoepf00] SCHOEPF, T.J.; RIEDER, W.F.; *Consequences for automotive relays of a 42 VDC power network in vehicles*. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on Volume 23, Issue 1, March 2000 Páginas: 177 – 182. Digital Object Identifier 10.1109/6144.833058

- [Sekii05] SEKII, Y. et al; *DC Tree and Grounded DC Tree in XLPE*. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on 16-19 Oct. 2005. Páginas: 523 – 526 Digital Object Identifier 10.1109/CEIDP.2005.1560735
- [Senner94] SENNER A; *Principios de electrotecnia*. Publicado por Reverte, 1994. Páginas 257 de 455.
- [Smith08] SMITH, P.; KUHN, P.; *Intermittent Fault Location on Live Electrical Wiring System*. Power Systems Conference, November 2008, Seattle, WA, USA, Session: Health, Monitoring, Prognostics and Diagnostics for Power. Páginas: 6. Descargado de la página web: <http://saeaero.saejournals.org/content/1/1/1101.full.pdf+html>
- [Spyker05] SPYKER, R. et al; *An evaluation of diagnostic techniques relevant to arcing fault current interrupters for direct current power systems in future aircraft*. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings 23-26 Oct. 2005 Páginas: 146 - 150. Digital Object Identifier 10.1109/EEIC.2005.1566277
- [Strang07] STRANG G; *Álgebra lineal y sus aplicaciones*. 4ª Edición. Publicado por Cengage Learning Editores, 2007. Páginas 496.
- [Sullivan] SULLIVAN, S.J; SLENSKI, G.A; *Managing Electrical Connection Systems and Wire Integrity on Legacy Aerospace Vehicles*. Descargado de: <http://jcaa.us/PublicLibrary/FullDocumentSearch/tabid/174/Default.aspx?xsq=Managing+Electrical+Connection+Systems+and+Wire+Integrity+on+Legacy+Aerosp+ace+Vehicles>. Páginas: 17.
- [Svoboda00] SVOBODA R; *Circuitos eléctricos: Introduccion al analisis y diseno/ Introduction to Analysis And Design*. 3ª Edición. Publicado por Marcombo, 2000. Páginas 1024.
- [Thomas07] THOMAS, R.P.; Solver, C.-E.; *A Method for Controlled Fault Interruption for Use with HV SF6 Circuit Breakers*. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne 1-5 July 2007 Páginas: 1135 – 1140. Digital Object Identifier 10.1109/PCT.2007.4538475

- [Thomas94] THOMAS K, E.; "Tema IV: Electric Wire and Wiring Practices" En: *Aircraft electricity & electronics*. 5ª Edición. Nueva York, EEUU. Ed. Mc Graw-Hill, 1994. p. 56-80.
- [Torres02] Torres-Sanchez Horacio; *El Rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. 2ª Edición. Colombia. Ed. Unibiblos-U. Nal. Colombia, 2002. p. 44-51; 55-63.
- [Xiaohu08] XIAOHU F.; RADUN, A.V.; *SiC based solid state power controller*. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE 24-28 Feb. 2008 Páginas: 1855 - 1860. Digital Object Identifier 10.1109/APEC.2008.4522979
- [Yammashita99] YAMMASHITA, T.et al; *270 V DC system-a highly efficient and reliable power supply system for both telecom and datacom systems*. Telecommunications Energy Conference, 1999. INTELEC '99. The 21st International 6-9 June 1999 Páginas: 6. Digital Object Identifier 10.1109/INTLEC.1999.794002
- [Zeng02] ZENG XIANGJUN; LI, K.K.; CHAN, W.L.; *Wavelet analysis based protection for high impedance ground fault in supply systems*. Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on Volume 1, 13-17 Oct. 2002. Páginas: 275 - 279 vol.1 Digital Object Identifier 10.1109/ICPST.2002.1053548
- [Zhihong99] ZHIHONG YE; BOROYEVICH, D.; KUN XING; LEE, F.C.; *Design of Parallel Sources in DC Distributed Power Systems by Using Gain-Scheduling Technique*. Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE. Volume 1, 27 June-1 July 1999. Páginas: 161 - 165 volumen 1. Digital Object Identifier 10.1109/PESC.1999.788997
- [Zhou08] ZHOU, Q.; SUMNER, M.; THOMAS, D.; *Fault detection for the aircraft distribution systems using impedance estimation*. Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference on 2-4 April 2008 Páginas: 666 - 670.
- [Zulia04] ZULIA U; *Revista técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia*. Publicado por La Facultad, 2004. Procedente de Universidad de Texas. Páginas: 17.

ANEXO I:

CAMPOS ELÉCTRICOS

8. ANEXO 1: CAMPOS ELÉCTRICOS

El conocimiento de los campos eléctricos es importante en el estudio de las descargas eléctricas. Los campos eléctricos influyen directamente en el desarrollo y formación de las descargas, ya que las líneas donde la intensidad del campo es mayor indican el camino más probable para que se forme la descarga. Cuanto mayor es el campo eléctrico mayor es la fuerza que impulsa el movimiento de los electrones, por lo que mayor será también la energía que éstos acumulen antes de chocar con las partículas del aislante. Por lo tanto, cuanto mayor es el campo eléctrico mayor es la probabilidad de que se produzcan ionizaciones por choque y por tanto será más fácil que se produzca la descarga.

Merece la pena recordar la ecuación que rige el campo eléctrico:

$$E = \frac{V}{d} \quad (44)$$

Donde V es la diferencia de potencial entre los conductores, d es la distancia de separación entre los mismos y E es la intensidad de campo eléctrico. Por lo tanto, cuanto mayor sea la diferencia de potencial o menor sea la distancia entre los conductores, mayor será la intensidad del campo eléctrico y mayor será la energía otorgada inicialmente al electrón libre. Hay que recordar que el aporte de energía no es el único requisito necesario para que se produzca la descarga, si no que se debe de tener un mínimo de partículas en el aislante para que la ionización por choque alcance un tamaño crítico, ver apartado 4.3.

Conocer la distribución del campo eléctrico nos permite saber el valor más alto que éste alcanza y dónde se produce, lo cual resulta muy útil para poder diseñar el tipo de aislante a emplear. Algunos tipos de distribuciones de campo eléctrico típicas se van a exponer a continuación.

8.1. CAMPOS ELÉCTRICOS UNIFORMES

Los campos eléctricos uniformes, son los más deseables a la hora de diseñar la protección de los sistemas eléctricos, porque permiten conocer su valor máximo y poder elegir con precisión los aislantes requeridos. Se define como campo eléctrico uniforme aquel en el que su intensidad de campo \vec{E} tiene la misma dirección y valor en todos los puntos. Es muy complicado que se tengan este tipo de campos en plataformas reales, ya que conseguir campos uniformes a través de aislantes finitos es muy difícil. Cuando se usan placas planas de reducido tamaño se produce la falta de homogeneidad en los bordes. Rogowski [Kuffel00] propuso electrodos planos con simetría axial, en la Figura 62 [Kuffel00] se puede ver la distribución del campo eléctrico entre ellos.

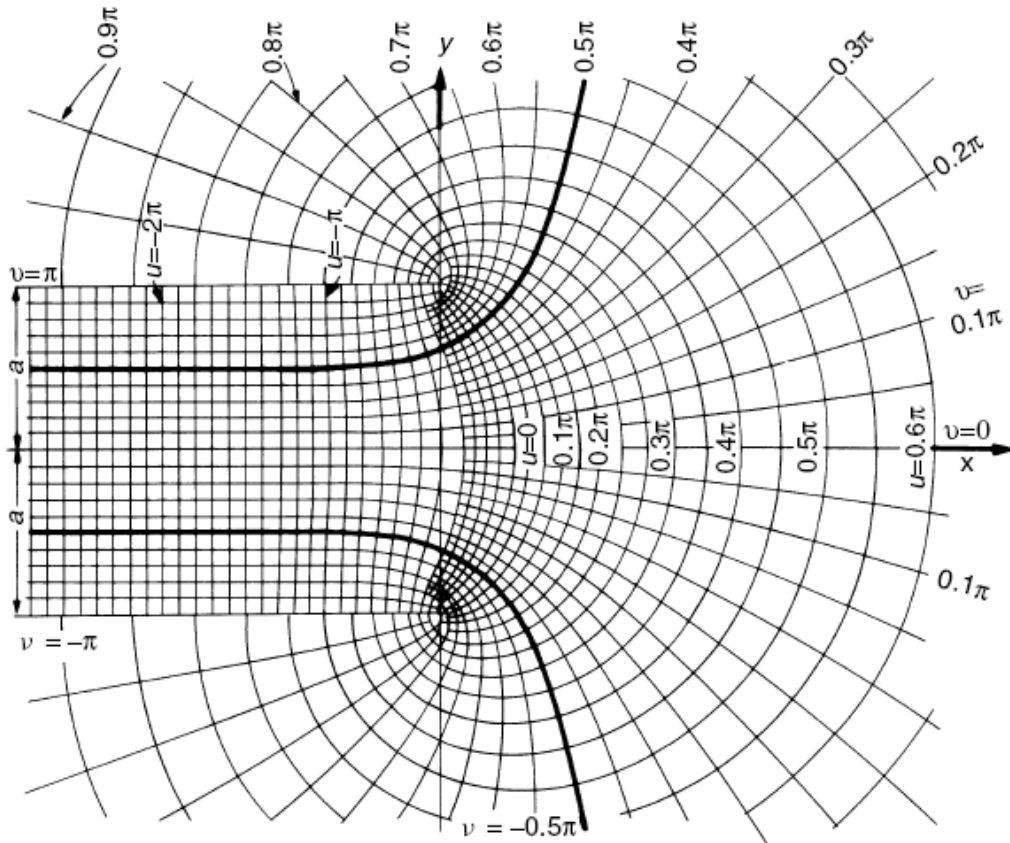


Figura 62. Líneas de campo para dos electrodos con la disposición de Rogowski

El campo es uniforme en toda la superficie de los electrodos, pero en el borde el campo pierde uniformidad. Se puede asumir que el valor de la intensidad del campo eléctrico en la zona de uniformidad viene representado por la *Ecuación* (44).

8.2. CAMPOS EN CILÍNDROS COAXIALES Y ESFERAS CONCÉNTRICAS

En la Figura 63 (a) y (b), se representa el campo eléctrico creado cuando los conductores son dos cilindros coaxiales (Figura 63 (a)) o dos esferas concéntricas (Figura 63 (b)). En ambos casos las líneas de fuerza son radiales y el campo E sólo depende de la distancia al eje del cilindro o al centro de la esfera. La distribución de campo eléctrico es simétrica. Los campos generados con este tipo de electrodos no son uniformes.

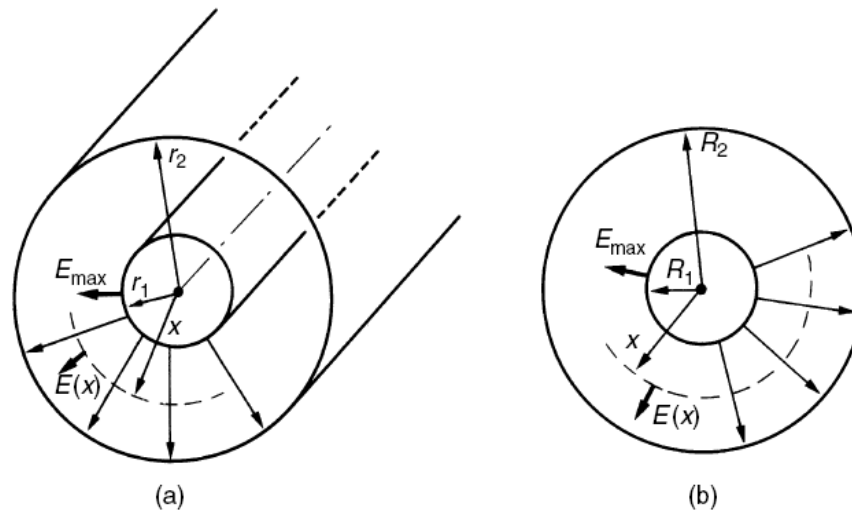


Figura 63. (a) Cilindros coaxiales y (b) esferas concéntricas

La carga superficial en los cilindros se expresa como carga por unidad de longitud Q/L , mientras que en las esferas es por unidad de volumen Q/V . Aplicando la ley de Gauss obtenemos las expresiones de los campos eléctricos:

Para cilindro coaxial:

$$E(x) = \frac{Q/l}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{1}{x} = \frac{V}{\ln(r_2/r_1)} \cdot \frac{1}{x} \quad (45)$$

Para esferas concéntricas:

$$E(x) = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{1}{x^2} = \frac{V}{\frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot R_2}} \cdot \frac{1}{x^2} \quad (46)$$

Donde los subíndices 1 y 2 hacen referencia al objeto interior y exterior, respectivamente. La permitividad del aislante que separa los conductores viene representada por ε y x representa la distancia desde el centro al punto donde medimos la intensidad del campo eléctrico.

La gran diferencia entre los dos campos es que en el caso de las esferas dicho campo disminuye mucho más rápidamente con la distancia que para los cilindros. También se puede concluir que el campo máximo, para condiciones similares ($r_1=R_1$; $r_2=R_2$), siempre es mayor en el caso de las esferas.

Las expresiones de campo máximo la son:

Para cilindro coaxial:

$$E_{max} = \frac{V}{r_1 \cdot \ln(r_2/r_1)} \quad (47)$$

Para esferas concéntricas:

$$E_{max} = \frac{V}{R_1 \cdot (1 - R_1/R_2)} \quad (48)$$

Un criterio empleado en el diseño de esferas concéntricas, teniendo en cuenta las dificultades que pueden surgir en la fabricación y en el ambiente que rodea a los electrodos con forma de esfera, indica que el diámetro necesario de los mismos para evitar rotura del aire es:

$$(2R_1) \approx 2V_{pico}/E_b \quad (49)$$

Siendo $E_b=12\sim 15$ kV (del aislante).

Para calcular el radio apropiado para evitar las descargas eléctricas entre dos cilindros coaxiales se puede emplear la Figura 64 [kuffel00].

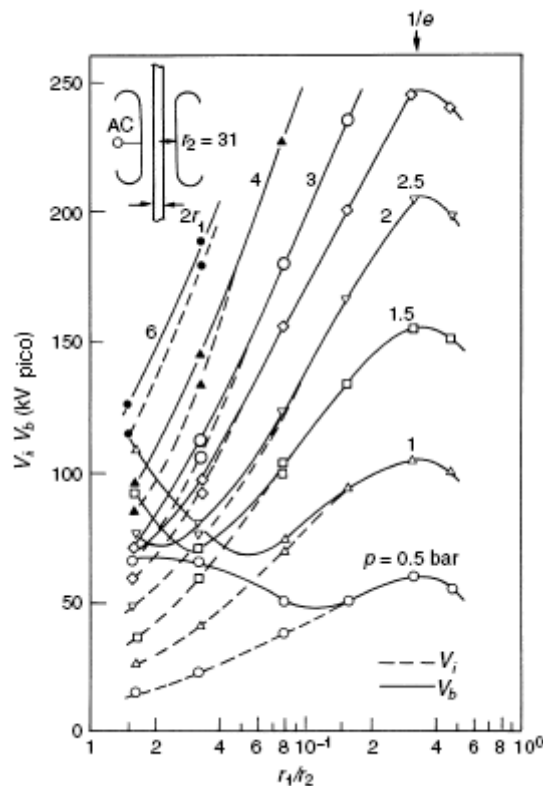


Figura 64. Tensión de ruptura (V_b) y de inicio de descarga (V_i) para cilindros coaxiales con aislante de SF6 en función de r_1/r_2 a 20°C

De esta figura se deduce que el tensión de inicio de descarga, representada por las líneas discontinuas, es siempre menor que el de ruptura, representada por líneas continuas, y que a medida que aumenta la presión del gas aislante, aumentan las tensiones de inicio y de ruptura. Además, cuanto mayor es la relación entre los radios, mayor es la tensión de ruptura/inicio.

Los valores de los radios óptimos responden a la *Ecuación (50)* y *Ecuación (51)*.

Para cilindro coaxial

$$\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = 1; \left(\frac{r_2}{r_1}\right)_{opt} = e \approx 2.72; (V_b)_{opt} = E_b \cdot r_1 \quad (50)$$

Para esferas concéntricas:

$$\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = 2; (V_b)_{opt} = E_b \cdot \frac{R_1}{2} \quad (51)$$

8.3. CAMPOS ENTRE ESFERAS

En la práctica, la disposición esfera-esfera se emplea para medir altas tensiones con entrehierros esféricos, mientras que los entrehierros esfera-plano son más representativos para el estudio más general de las tensiones de ruptura. Éste último tipo de entrehierro representa el caso de un cable apoyado sobre el fuselaje del avión.

La influencia de la conexión de cargas sobre la distribución del campo ha sido simulada por Steinbigler [Kuffel00].

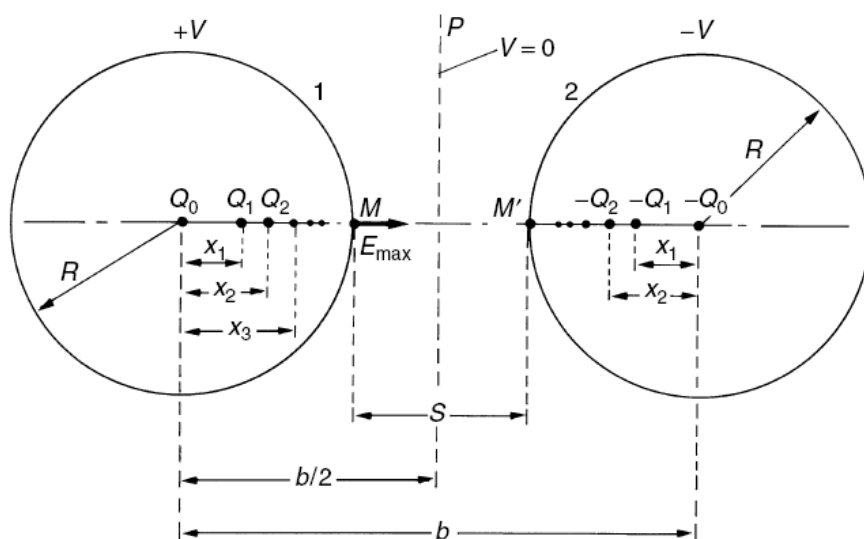


Figura 65. Montaje tipo esfera-esfera

En la Figura 65 la disposición es esfera-esfera, teniendo las dos esferas el mismo diámetro y una cargada positivamente (+V) y la otra negativamente (-V). De esta manera se consigue una distribución de campo simétrica si y sólo si en el plano imaginario P, situado a la misma distancia entre los dos centros, el potencial es $V=0$. El potencial cero también se obtiene a distancias muy lejanas a las esferas.

Una magnitud importante es la línea de campo con mayor fuerza, que se encuentra entre los puntos M-M' (a la mínima distancia entre los centros). La máxima fuerza del campo en los puntos M y M' viene dada por la *Ecuación (52)* [Kuffel00]:

$$E(R) = E_{max} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(R - x_n)^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(b - R - x_n)^2} \right\} \\ = RV \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \prod_{k=1}^n \left(\frac{R}{b - x_{k-1}} \right) \right\} \left\{ \frac{1}{(R - x_n)^2} + \frac{1}{(b - R - x_n)^2} \right\} \quad (52)$$

Donde

$$Q_n = Q_{n-1} \frac{R}{(b - x_{n-1})} = 4\pi\epsilon_0 RV \prod_{k=1}^n \frac{R}{(b - x_{k-1})} \quad (53)$$

$$X_n = \frac{R^2}{(b - x_{n-1})}; \quad \text{con } n = 1, 2, 3 \dots \quad (54)$$

$$x_0 = 0 \quad (55)$$

Esta expresión puede usarse para calcular el campo en cualquier punto de la línea M-M'.

Una simplificación de la *Ecuación (52)* para $S > R$ es:

$$E_{max} \cong 0.9 \cdot \frac{V}{S/2} \cdot \frac{R + S/2}{R} \quad (56)$$

Esta ecuación puede usarse también para la disposición de esfera-plano si la distancia del entrehierro es $S/2$ y V la tensión aplicada.

La Figura 66 [Kuffel00] muestra una representación gráfica de la *Ecuación (56)*.

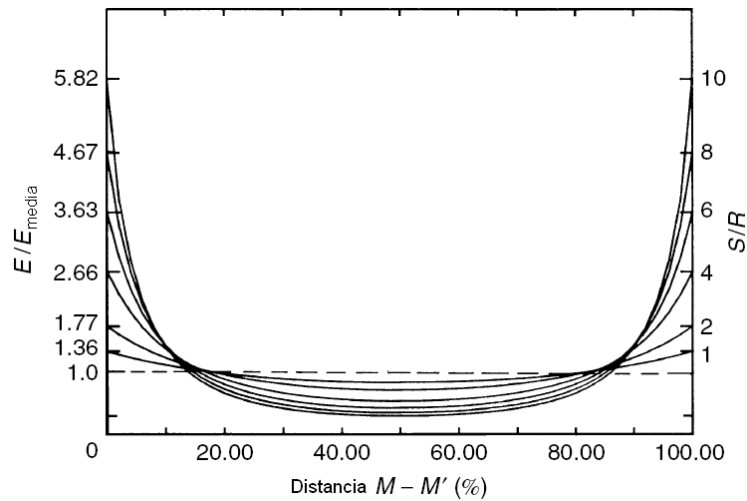


Figura 66. Distribución del campo eléctrico a lo largo del eje M-M' con disposición esfera-esfera para varios valores de S/R

En la Figura 66 se demuestra la pérdida de uniformidad del campo eléctrico a medida que incrementamos la relación S/R.

8.4. CAMPO ENTRE CILINDROS PARALELOS

Los mazos de cables forman parte del grupo de elementos que crean distribuciones de campo eléctrico entre cilindros paralelos, y son muy empleados en alta tensión.

A continuación se analiza el caso de dos conductores cilíndricos paralelos con carga opuesta separados una distancia b , ver Figura 67 y Figura 68 [Kuffel00]. El potencial en un punto P, ϕ_p es:

$$\phi_p = \frac{\rho_l}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \ln \frac{r''}{r'} + K \quad (57)$$

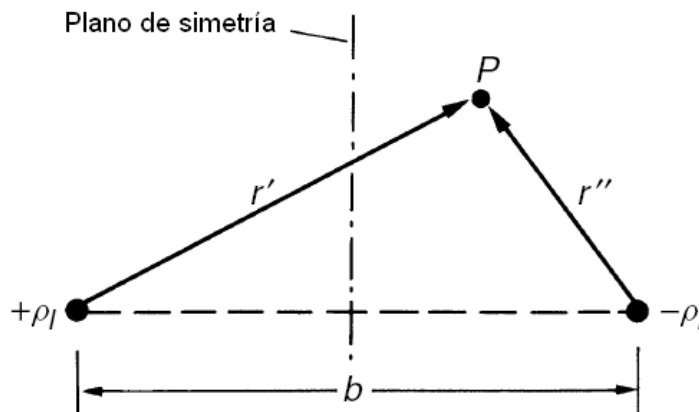


Figura 67. Disposición de dos líneas cargadas en paralelo

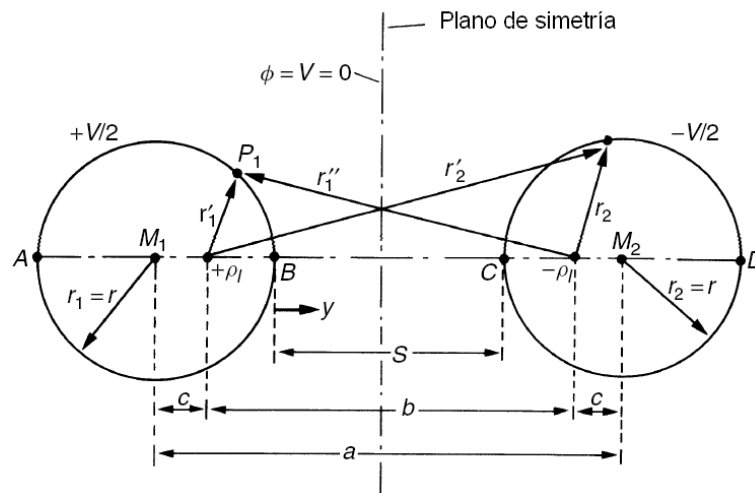


Figura 68. Dos conductores eléctricos iguales en paralelo, simétricamente cargados

Si comparamos este tipo de distribución con la de esfera-esfera, podemos concluir que los campos eléctricos creados por cilíndricos paralelos son más uniformes que los creados por esferas (para ratios similares).

En la Figura 69 [Kuffel00] se puede ver la distorsión del campo eléctrico a lo largo de la línea de menor distancia que une los cilindros paralelos, ver Figura 68, a medida que vamos variando el valor de los radios de los cilindros.

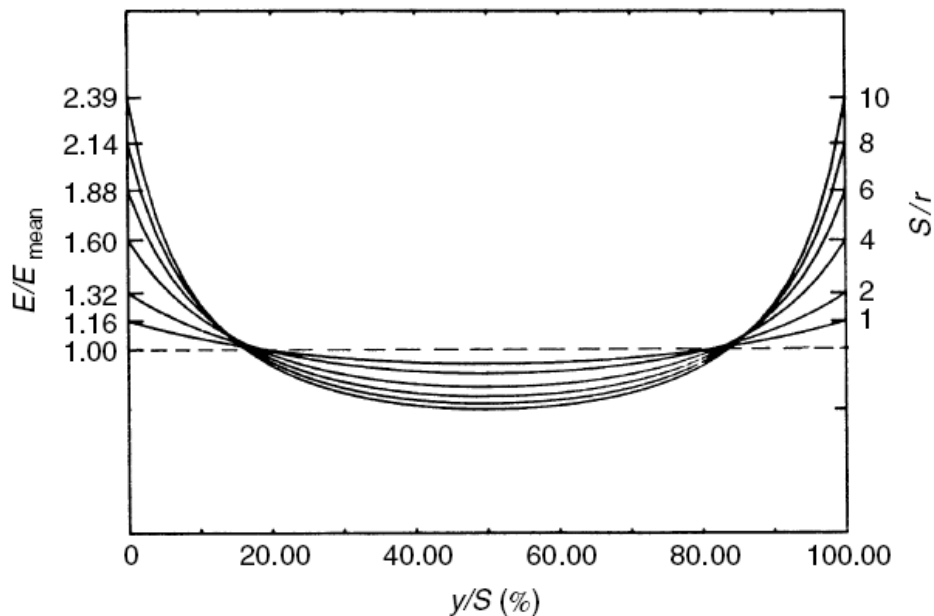


Figura 69. Distribución del campo eléctrico entre dos conductores cilíndricos del mismo radio r , para diferentes ratios S/r , siendo S la longitud del entrehierro

Se puede comprobar que al igual que para la disposición de esfera-esfera, ver Figura 66, a medida que vamos disminuyendo el radio de los conductores en función de la distancia entre ambos, el campo eléctrico va disminuyendo su

uniformidad. Esto es lógico dado que los campos uniformes suelen obtenerse a partir de electrodos planos y paralelos (caso extremo de radio infinito), mientras que cuanto más “puntiagudo” es el electrodo el campo eléctrico que genera es menos uniforme.

Hasta ahora hemos hecho un análisis macroscópico, sin tener en cuenta que las superficies de los electrodos no tienen simetrías perfectas y que los aislantes contienen partículas microscópicas distribuidas de forma no uniforme en su seno. Esto es, se ha supuesto que la superficie de los conductores era perfecta y que el material aislante era isotrópico y homogéneo.

A partir de ahora se van a tener en cuenta estas características.

8.5. CAMPOS CON MATERIALES ISOTRÓPICOS Y MULTIDIELÉCTRICOS

La homogeneidad e isotropía se puede dar en los gases o en algunos líquidos puros. En los sólidos, las microestructuras que los forman los hacen ser cristalinos o amorfos y difícilmente presentan propiedades isotrópicas y homogéneas.

Muchos sistemas de aislantes para alta tensión están compuestos por varios tipos de materiales dieléctricos, con diferentes permitividades. Incluso si se emplea un único aislante las propiedades en el mismo pueden variar de un punto a otro. Los principales motivos para emplear aislantes con diferentes constantes dieléctricas suelen ser de carácter mecánico.

8.5.1. Configuraciones simples

El caso más simple de no homogeneidad en el aislante se muestra en la Figura 70 [Kuffel00]. En este caso se tienen dos tipos de aislante con diferentes constantes dieléctricas, ocupando el espacio presente entre dos electrodos planos y paralelos entre sí.

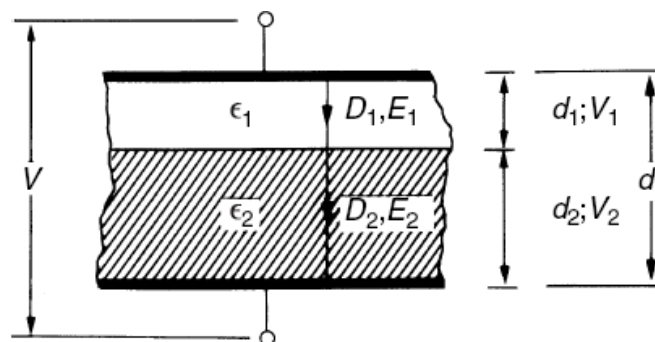


Figura 70. Disposición de electrodos planos paralelos con dos capas diferentes de aislante

Para la disposición de la Figura 70, la tensión entre los dos conductores viene marcada por la *Ecuación (58)*:

$$V = E_1 d_1 + E_2 d_2 \quad (58)$$

Hay que tener en cuenta que cuanto menor sea el valor de la permitividad de un aislante ε , menor resistencia opone al paso de la corriente a través de él y peor protege frente a las descargas eléctricas. Es por eso que hay que tener en cuenta al emplear varios aislantes diferentes, que el valor a tener en cuenta en el diseño del sistema de protección, por ser el más crítico, es el del aislante con menor permitividad.

Si las permitividades de los aislantes son muy diferentes, esta no será una buena disposición, ya que el aislante con menor permitividad puede sufrir ruptura dieléctrica y forzar entonces la ruptura de los demás aislantes.

Para un aislante formado por la mezcla de varios materiales con diferentes permitividades, la permitividad resultante es:

$$\varepsilon_{res} = \frac{1}{(v_1/\varepsilon_1) + (v_2/\varepsilon_2) + \dots + (v_n/\varepsilon_n)} \quad (59)$$

Con

$$\sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad \text{o } 100\%$$

Siendo v el porcentaje en volumen.

Los aislantes multicapa presentan varias ventajas, como la flexibilidad. Además se puede mejorar el aislamiento separando las capas con líquidos aislantes específicos de alta tensión, o con gases con tensión de ruptura muy alto, como el SF₆.

8.6. DISTRIBUCIONES DE CAMPO TÍPICAS EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICOS

Dibujar o calcular el campo eléctrico es posiblemente la mejor forma de conocer cómo afecta éste en un aislante eléctrico. Algunos campos eléctricos típicos se muestran a continuación.

- Campo eléctrico entre dos cables (conductores cilíndricos paralelos) con diferente polaridad (dipolo) se muestra en la Figura 71 [Izaurieta07].

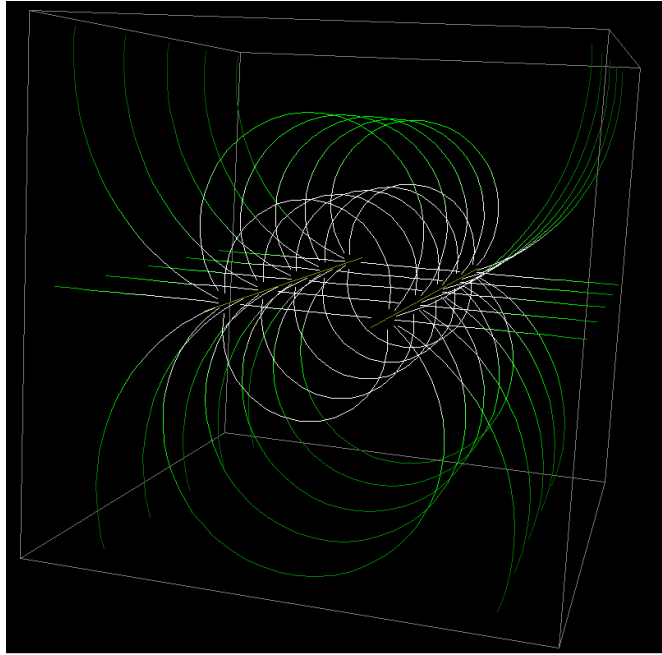


Figura 71. Campo eléctrico entre dos conductores lineales con diferente polaridad

- Campo eléctrico entre dos cables (conductores cilíndricos paralelos) con igual polaridad. Figura 71 [Izaurieta07].

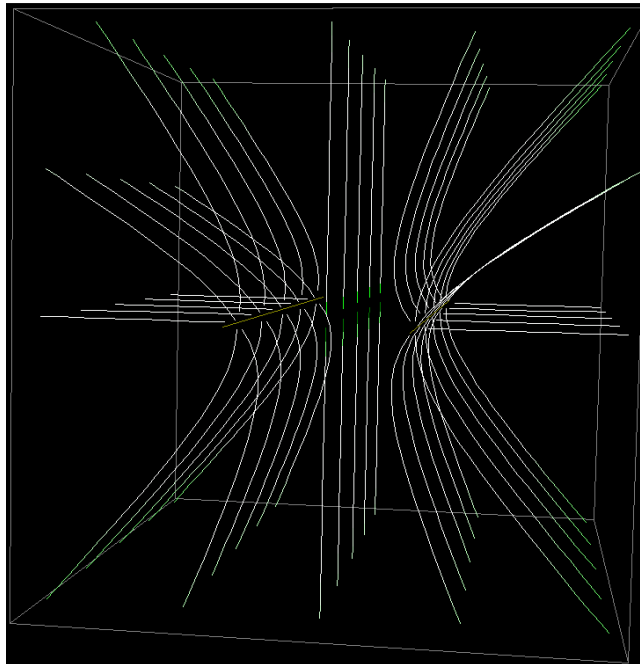


Figura 72. Campo eléctrico entre dos conductores lineales con la misma polaridad

- Campo eléctrico entre cuatro cables (conductores cilíndricos paralelos) con distinta polaridad. Figura 73 [Izaurieta07].

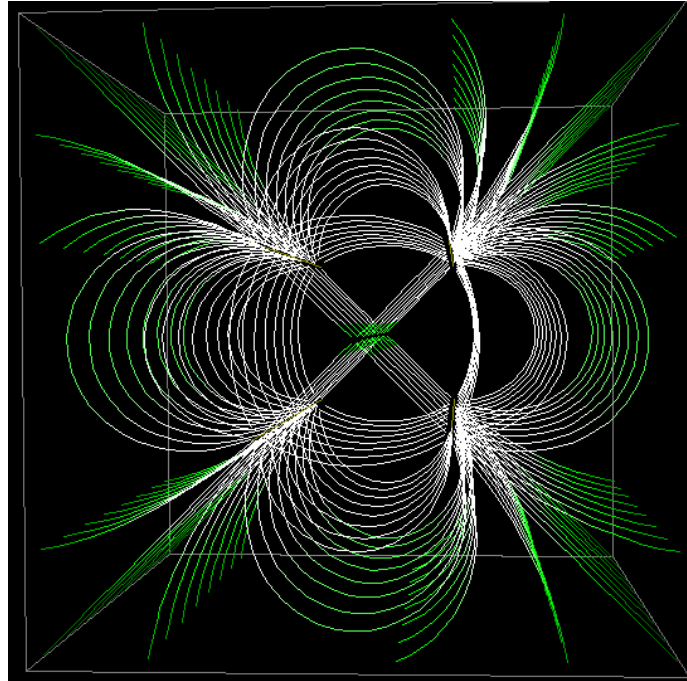


Figura 73. Campo eléctrico entre cuatro conductores lineales con distinta polaridad

- Campo eléctrico entre un conductor y el plano de tierra (conductor cilíndrico paralelo al plano). Figura 74 y Figura 75 [Dunbar72].

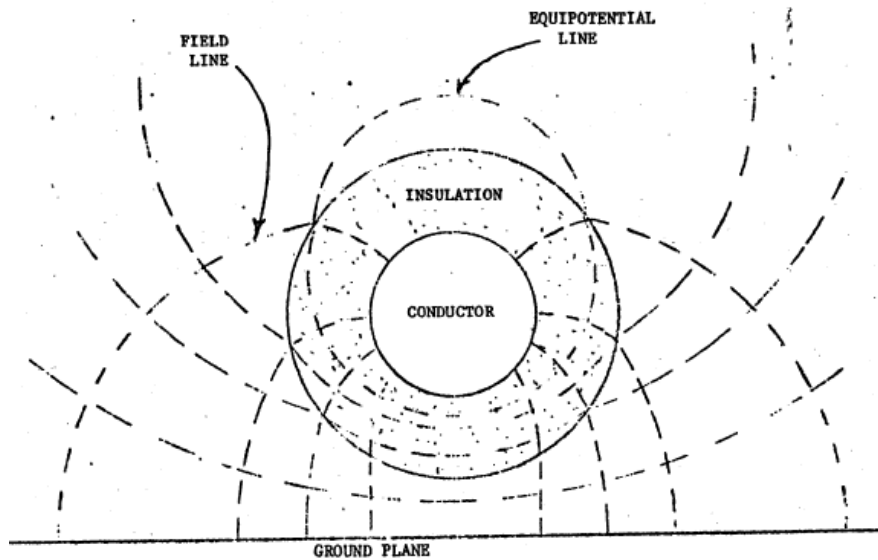


Figura 74. Distribución de campo eléctrico entre un conductor y el plano de tierra

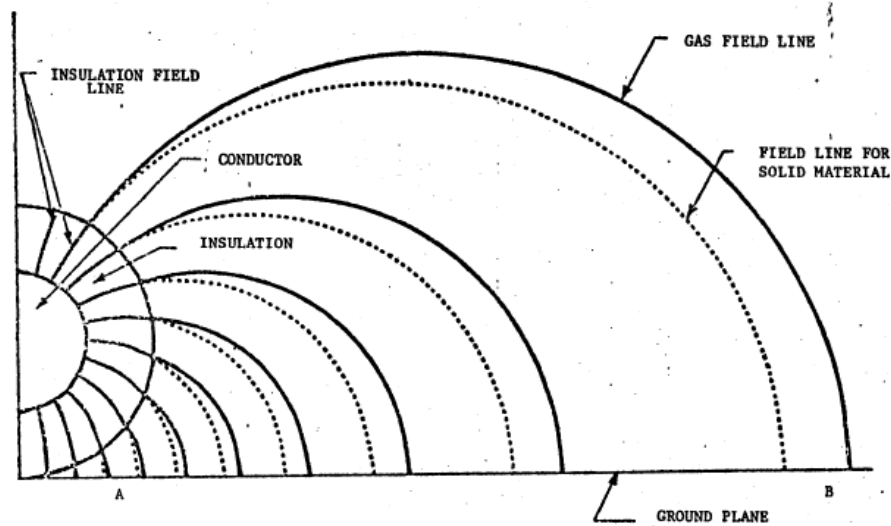


Figura 75. Distribución de campo eléctrico entre un conductor y el plano de tierra

- Campo eléctrico entre un conductor cilíndrico y el plano de tierra, cuando el conductor sufre una curvatura en su recorrido Figura 76 [Dunbar72].

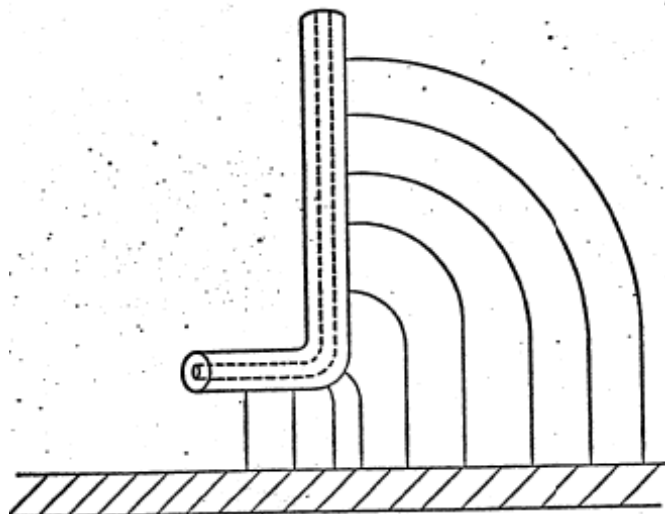


Figura 76. Líneas de campo eléctrico desde un conductor cilíndrico al plano de tierra

Para obtener una información más detallada sobre las ecuaciones que rigen los campos eléctricos y magnéticos se recomienda consultar la bibliografía [Dunbar72], [Kuffel00], [Dios98], [Davidovich81] y [Izaurieta07].

ANEXO II:

PARTICULARIDADES DE LAS DESCARGAS

9. ANEXO II: PARTICULARIDADES DE LAS DESCARGAS

9.1. EFECTO PENNING

La Ley de Paschen no es aplicable a muchos casos de mezclas gaseosas. En la Figura 77 [Kuffel00] se muestra un ejemplo para el cual al añadir unas pequeñas cantidades de Argón en el Neón, la tensión de ruptura de este último disminuye notablemente.

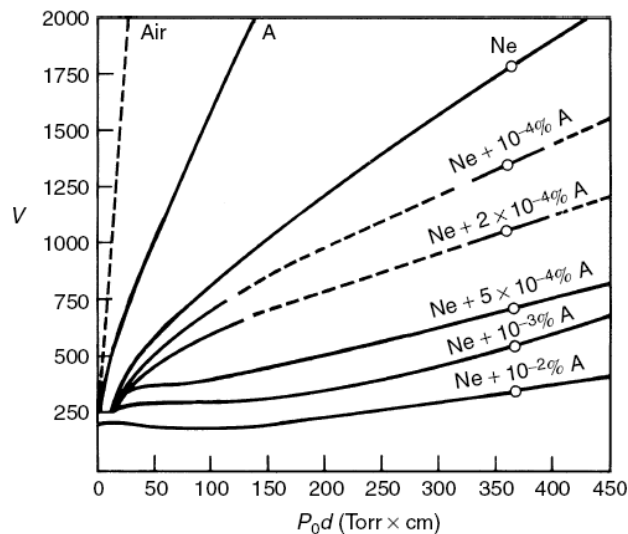


Figura 77. Curvas de tensión de ruptura para la mezcla de neón-argón con electrodos de planos paralelos, entrehierro de 2 cm y $T=0^{\circ}\text{C}$

Esto es debido a que el argón excitado es metaestable y tiene una energía 0.9 veces superior a la energía potencial de ionización del neón. Cuando los átomos metaestables del argón chocan con los del neón, la probabilidad de ionización es muy alta. Este fenómeno se conoce con el nombre de efecto Penning.

9.2. DESARROLLO DE PEEK CON DOS CILINDROS COAXIALES

Para el caso especial de dos conductores cilíndricos coaxiales separados por aire, la intensidad del campo que fuerza el inicio de la descarga eléctrica parcial en el aire responde a la Ecuación (60) [Kuffel00], desarrollada por Peek.

$$\frac{E_c}{\delta} = 31.53 + \frac{9.63}{\sqrt{\delta \cdot r}} \quad (60)$$

Donde E_c [kV/cm] es el campo eléctrico crítico de inicio del efecto corona, δ es la densidad del aire y r [cm] es el diámetro del conductor. Esta expresión sólo es válida para este caso aislado y particular, para ver otro caso de inicio de descarga parcial se recomienda ver el apartado 3.3.

Para valores de $\delta \cdot r > 1$, los resultados obtenidos a partir de la *Ecuación (60)* se alejan de los experimentales. Es por eso que se emplea una expresión más reciente desarrollada por Zaengl [Kuffel00] (*Ecuación (61)*).

$$\left(\frac{E_c}{\delta}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{E_c}{\delta}\right) \cdot E_0 \cdot \ln \left[\frac{1}{E_0} \cdot \left(\frac{E_c}{\delta}\right)^2 \right] - E_0^2 = \frac{K/C}{(\delta \cdot r)} \quad (61)$$

Siendo K/C una constante dependiente del campo eléctrico. Este montaje da a entender que el campo crítico E_c con disposiciones coaxiales es independiente del radio del cilindro exterior (R), lo cual es cierto siempre que $E(R) \leq \delta \cdot E_0$.

Una comparación de la certeza de las *Ecuaciones (60)* y *(61)* se puede ver en la Figura 78 [Kuffel00].

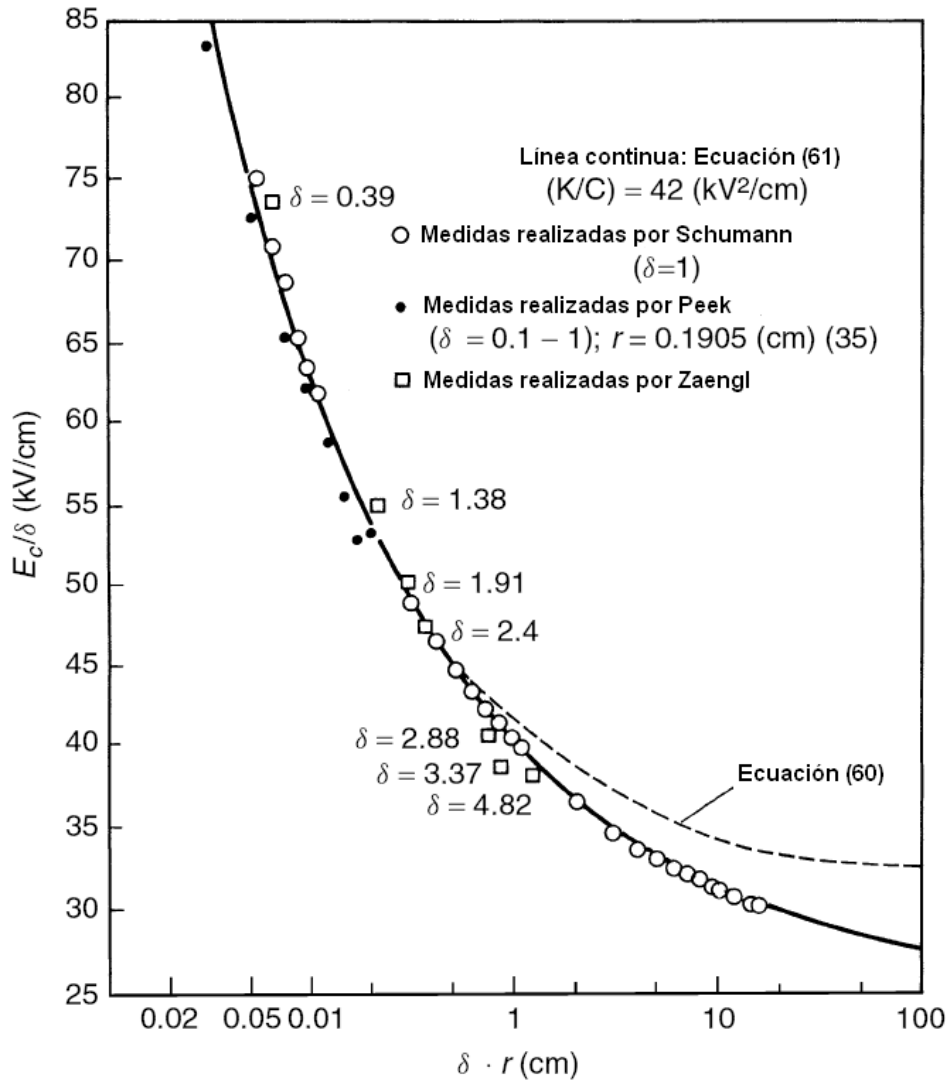


Figura 78. Variación de la resistencia del campo al inicio de corona (E_c/d) para cilindros coaxiales en aire

En la Figura 78 la línea discontinua muestra los valores obtenidos por la expresión de Peek (*Ecuación (60)*), mientras que la línea continua es la representación gráfica de la *Ecuación (61)*. Se puede comprobar que para valores $\delta \cdot r < 1$, la ecuación de Peek se ajusta con bastante precisión a los experimentales, pero se aleja de los mismos a medida que aumenta el radio de los cilindros.

ANEXO III:

SISTEMA ELÉCTRICO DC.
ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA CON FALTAS DC.

10. ANEXO III: SISTEMA ELÉCTRICO DC. ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ENERGÉTICA CON FALTAS DC.

La nueva tendencia en la fabricación de aviones más eléctricos (MEA) conlleva numerosas ventajas de peso, espacio, flexibilidad y fiabilidad.

Los nuevos sistemas de distribución de potencia tienden a usar tensión continua (DC) en lugar de tensión alterna (AC). Las ventajas del empleo de DC ya han sido probadas y ahora, gracias a los avances tecnológicos, empieza a ser viable. Empleando DC es posible obtener mayores rangos de potencia, mayor eficiencia y simplicidad en la integración de los sistemas de almacenaje de energía. Sin embargo en lo referente a los sistemas de protección todavía queda mucho por desarrollar para conseguir la seguridad y fiabilidad necesaria.

10.1. VENTAJAS DE LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DC:

A continuación se van a enumerar algunas de las ventajas que proporciona el empleo de tensión continua en el sistema eléctrico.

- Al emplear un sistema de distribución en DC se reduce el número de convertidores empleados.
- Una distribución DC permite el paralelado de múltiples generadores en un solo bus de distribución.
- Muchos sistemas de almacenamiento de energía empleados son DC, por lo que su conexión se volvería mucho más sencilla. Esto es especialmente útil en los aviones no tripulados (UAV).
- Reducción del peso y coste del cableado.
- Los sistemas DC no tienen problemas de compensación de reactiva.

Hasta hace poco había varios problemas que impedían la implementación de los sistemas DC, tales como las corrientes negativas que se formaban en la operación de los sistemas electrónicos.

En DC es necesario mayor nivel de protección que en AC, ya que no existe un punto en el que la onda pase por cero. Los Circuit Breakers deberán ser mayores para cortar las corrientes. Este aumento de tamaño de los CB, unido al aumento de peso y a que su actuación es más lenta, es una gran desventaja. Para solucionar este problema se están desarrollando nuevos dispositivos de protección de estado sólido.

Para comprender mejor las sobretensiones que se producen por las corrientes transitorias ocasionadas con la descarga de los condensadores, es necesario conocer los fundamentos físicos del transporte de la energía a través de la red. A continuación se va a realizar un análisis energético de las faltas que se producen en un sistema eléctrico de tensión continua.

10.2. ANÁLISIS ENERGÉTICO ANTE FALTAS DC

La energía que almacena un condensador cuando se le aplica una tensión viene representada por la *Ecuación (62)* [Fletcher08]:

$$E_c = \frac{1}{2} CV^2 \quad (62)$$

Donde E_c es la energía almacenada en Julios, C es la capacidad en Faradios y V es la tensión en Voltios.

De la misma manera, la energía almacenada por una bobina al pasar por ella una corriente es:

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2 \quad (63)$$

Con E_L en Julios, L en Henrios e I en Amperios.

Si un condensador grande se descarga en una bobina pequeña, para compensar el equilibrio energético, la corriente a través de la bobina es muy grande (*Ecuación (64)* [Fletcher08]).

$$\frac{1}{2} CV^2 \approx \frac{1}{2} LI^2 \quad (64)$$

De la misma forma, si una bobina transfiere una gran cantidad de energía a un condensador pequeño se desarrollará una tensión muy alta en el condensador. La dependencia de la corriente de la falta con la inductancia y capacitancia del camino por el que se produce dicha corriente es:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (65)$$

En la Figura 79 [Fletcher08] se muestra el esquema empleado en el estudio de la transferencia de energía.

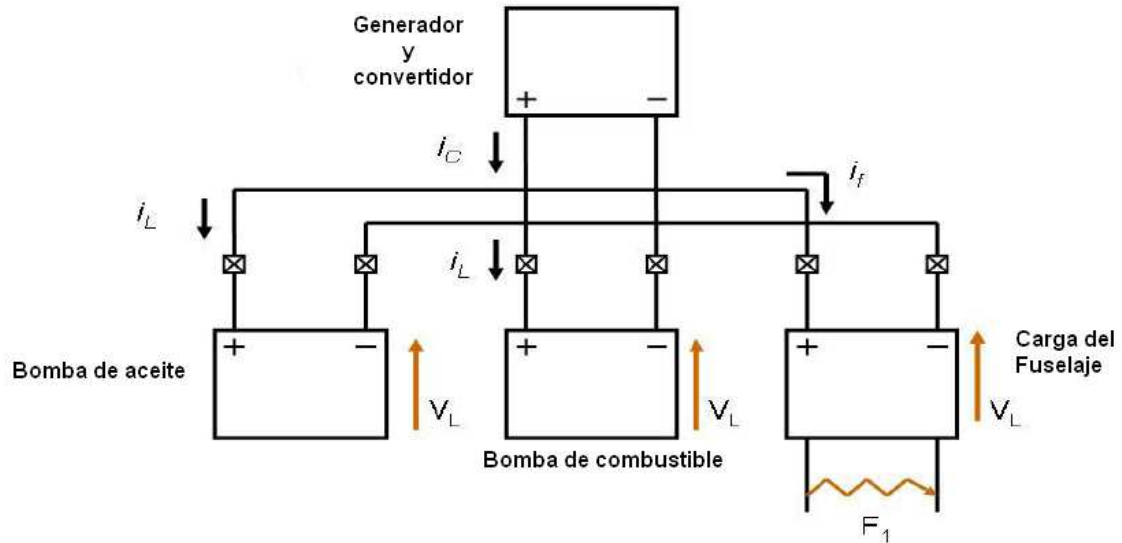


Figura 79. Flujo de corriente ante falta DC

En esta figura un corto en F_1 provoca un colapso de tensiones en toda la red. Este cambio en la tensión es soportado por los condensadores, que entregan su energía almacenada a la red. Esta descarga de corriente puede ser muy alta debido a la baja impedancia de la red (cables), por lo que i_c suele ser muy alta (y de corta duración). Esto conlleva a la aparición de la falta i_f .

Cuando los interruptores más cercanos a la falta consiguen aislarla, la energía inductiva vuelve a distribuirse entre los condensadores. Este proceso puede provocar sobretensiones. Un punto clave que influye en gran medida en el comportamiento de la red son las corrientes anteriores a la falta. Un estudio [Fletcher08] afirma que la velocidad con la que actúan los CB es decisiva ya que cuanto más rápido lo hacen menor es la corriente que circula por el sistema y mayor es la sobretensión producida. Se recomiendan tiempos comprendidos entre $50\mu s$ y siempre menores a $1ms$.

ANEXO IV:

SISTEMA DE PROTECCIÓN DE RELÉS
MEDIANTE LA EXTINCIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO

11. ANEXO IV: SISTEMA DE PROTECCIÓN DE RELÉS MEDIANTE LA EXTINCIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO

Para proteger los contactores de los relés se han analizado las condiciones de extinción del arco eléctrico [Schoepf00].

El circuito empleado en este estudio se representa esquemáticamente en la Figura 80.

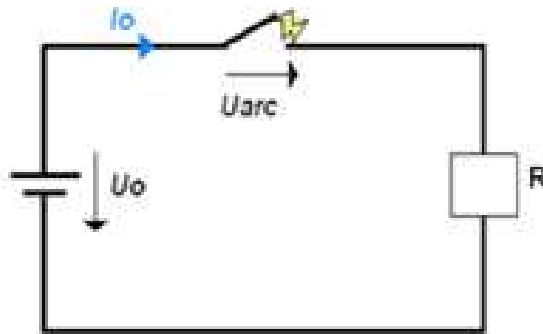


Figura 80. Circuito esquemático de arco eléctrico entre contactores

Para que el arco se extinga es necesario que se cumpla la Ecuación (66) [Schoepf00].

$$U_{arc} > U_0 - I \cdot R \quad (66)$$

Donde U_{arc} se calcula como la suma entre la caída de tensión en el cátodo y en el ánodo, más la tensión que cae por la corriente que atraviesa el espacio entre ambos (depende de las condiciones atmosféricas).

Si la distancia entre los contactores del relé no es suficientemente grande para extinguir el arco hay otros métodos para hacerlo.

Todos los métodos tratan de aumentar la tensión necesaria para que se desarrolle el arco (U_{arc}), aumentando la distancia entre contactores. Para ello se pueden emplear contactos en puente, se puede dividir el arco...

La Figura 81 [Schoepf00] muestra que para 42V/10A y longitud de entrehierro de 0.25mm el arco no se extingue. Se necesitaría una longitud de arco único de 0.65mm para ello o, como aparece en la dicha figura, dos longitudes en serie de 0.25mm.

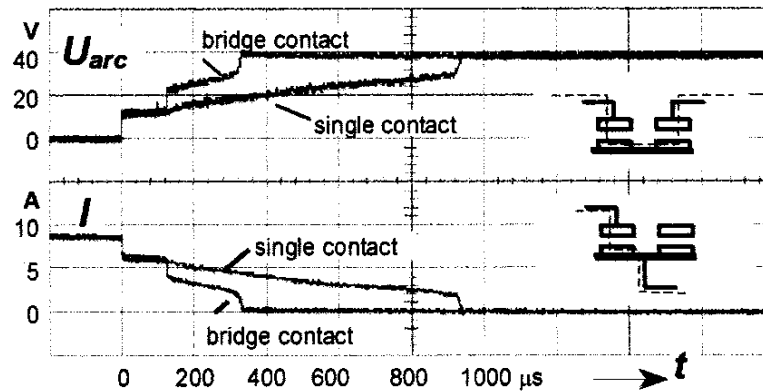


Figura 81. Configuración de contactos en puente para la extinción del arco

11.1. CURVA DE CARGA LÍMITE

La Figura 82 [Schoepf00] muestra la curva de carga límite, para cargas puramente resistivas en dos casos de relés:

- K-D: contactos simples, máxima corriente 20A.
- K-B: puente de contactos, máxima corriente 35A.

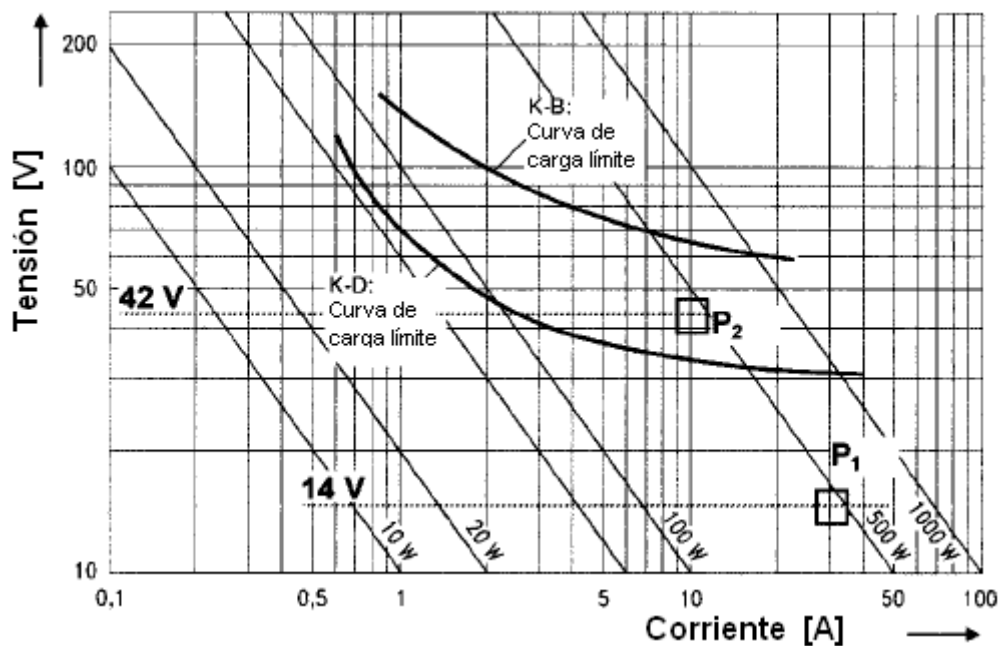


Figura 82. Curvas de carga límite

Para los puntos por debajo de la curva de carga límite, el arco se extingue en menos de 10ms (14V/40A).

Para los puntos por encima de la curva de carga límite, el arco no se extingue (100V/10A). En este caso, para estos relés con una cierta distancia entre contactos, el arco no se extingue y provoca la ruptura del relé.

De acuerdo con la Figura 82, en el caso K-D, el relé puede interrumpir una corriente de 30A a 14V, pero no una con la misma potencia (420W) de 10A, 42V.

En las siguientes tres figuras (Figura 83, Figura 84 y Figura 85) [Schoepf00] se muestran los oscilogramas de tensión y corriente que ilustran lo discutido anteriormente.

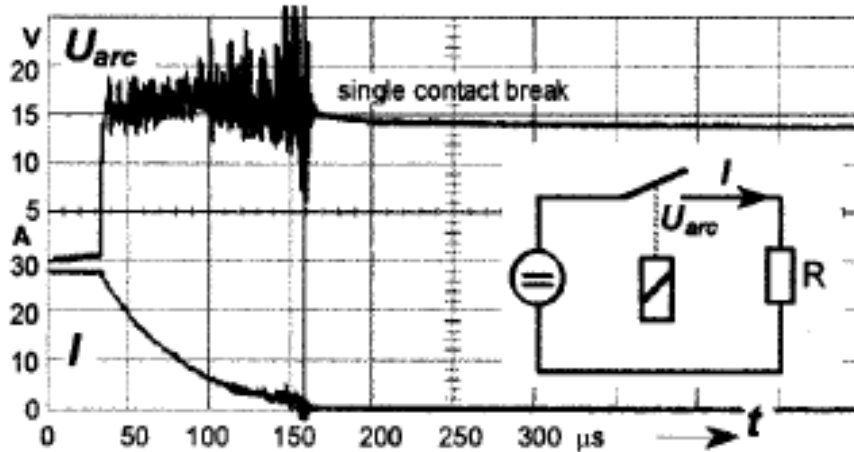


Figura 83. Tensión y corriente de arco para 14V_{DC}, 30A, carga resistiva, tipo de relé K-D con contactor simple y longitud de gap 0.25mm

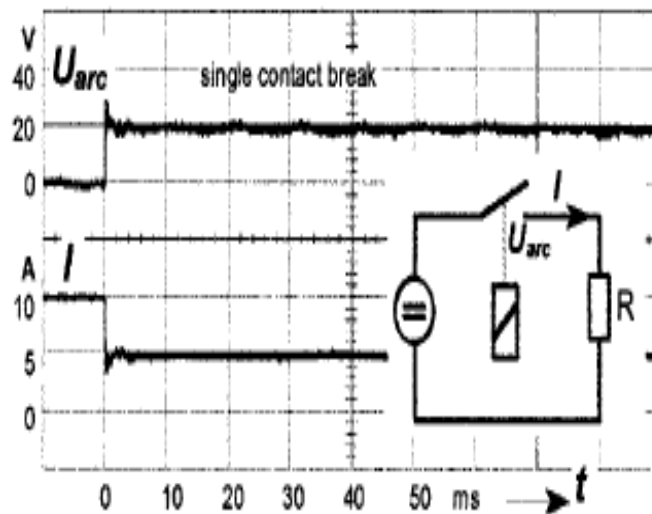


Figura 84. Tensión y corriente de arco para 42V_{DC}, 10A, carga resistiva, tipo de relé K-D con contactor simple y longitud de gap 0.25mm

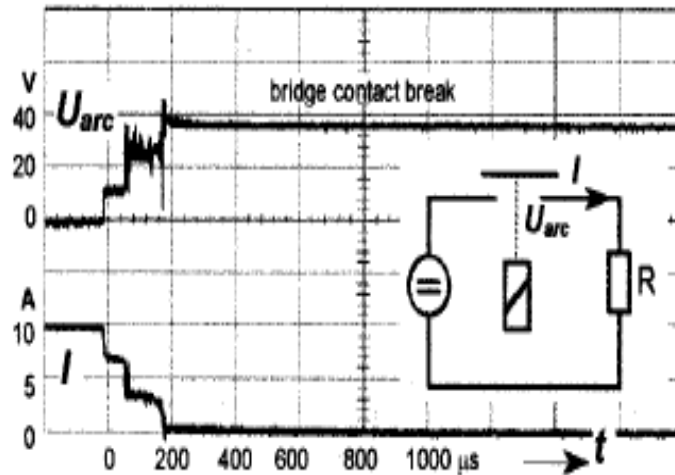


Figura 85. Tensión y corriente de arco para $14V_{DC}$, 30A, carga resistiva, tipo de relé K-B con contactor en puente y longitud de gap $2 \times 0.25\text{mm}$

En la Figura 83 se puede ver el arco eléctrico que se forma al forzar que la corriente pase de 30A a 0A en $130\mu\text{s}$.

En la Figura 84 el arco no se extingue, como se podía saber gracias a la Figura 82 (Curvas de carga límite). Hay una caída de corriente desde 10 hasta 5A, valor suficiente para mantener el arco estable.

En la Figura 85 se ve como el relé K-B consigue cortar la corriente, en las mismas condiciones en las que el anterior no pudo.

Estas curvas han sido calculadas para una carga determinada, y sólo son válidas para esa carga [Schoepf00].