



On Protective Efficiency of ECCD: a Statistic Analysis and a Quantum Engineering Modelization

Eusebio Bernabeu Martinez, Javier Maldonado Pardo and
María Ana Sáenz Nuno

EasyChair preprints are intended for rapid
dissemination of research results and are
integrated with the rest of EasyChair.

September 14, 2019

SOBRE EL ALCANCE PROTECTOR DE LOS DDCE ^(W) : UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y UNA MODELIZACIÓN CON INGENIERIA CUÁNTICA

Maldonado Pardo, Javier^{1*}; Saénz Nuño, María Ana²; Bernabéu Martínez, Eusebio^{3*}

¹ Dinnteco International, ² ICAI- Universidad Pontificia de Comillas,

³ Universidad Complutense de Madrid

* Email: jmaldonado@dinnteco.com (JMP). *Email: ebnabeu@fis.ucm.es (EBM)

Resumen: Es destacable la eficiente aplicación de los DDCE en Defensa, donde la mayor parte de las instalaciones y equipamiento por su emplazamiento y materiales están fuertemente expuestos a descargas eléctricas de rayos en la atmósfera y a potenciales efectos de radiofrecuencias y pulsos de corriente: los DDCE son utilizados para proteger instalaciones móviles de telecomunicaciones en asentamientos militares, como protección de antenas, radares, shelters e infraestructuras terrestres; en acuartelamientos, polvorines, torres de control de aeródromos y helipuertos, hangares, puesto de mando y de operaciones, hospitales de campaña, entre otros; también en navíos de la Armada: portaviones, fragatas, transporte, dragaminas,...; en puertos: provisionamiento de combustibles, dársenas.

En esta aportación se presenta un análisis estadístico que permite estimar el alcance protector de los DDCE. Análisis realizado a partir de los datos aportados por la base METEORAGE concertada por DINNTECO en un seguimiento continuado para ocho puntos/entornos de observación en los que hay instalados DDCE y en intervalos anuales desde 15, 8, 4, 3 y 2 años, según los puntos/entorno de emplazamiento. De ello se infiere un Índice de Eficacia Protectora: PEI (Protective Efficacy Index). Se presenta un esquema formal interpretativo que sustenta la operatividad física de los DDCE. Esquema que se establece por el conocimiento del comportamiento multimodal de los DDCE en rango de las radiofrecuencias (0,5 a 2,4 GHz), las distribuciones del campo eléctrico y magnético estáticos en el interior y en el entorno próximo exterior y por asignación de la disipación energética al proceso cuántico de super-absorción. La modelización con ingeniería cuántica permite considerar a un DDCE como un dispositivo cuántico sumidero de cargas-corrientes eléctricas y de campos electromagnéticos.

Palabras clave: Protección, Seguridad, Instalaciones, Radiofrecuencia e Ingeniería Cuántica.

1. Introducción

Un DDCE es un dispositivo pasivo captador y compensador en el tiempo de campos eléctricos variables y cargas eléctricas del entorno medioambiental donde está ubicado, que - debidamente instalado- protege estructuras, animales y personas en una amplia zona de cobertura ($\cong 200$ m), frente a descargas eléctricas naturales (rayos), a pulsos de corrientes y campos electromagnéticos derivados o exógenos. Las infraestructuras críticas debido al valor estratégico en seguridad sobre la función que prestan y por su elevado coste necesitan de recursos que les aporten resiliencia; en este caso, obviando las descargas eléctricas directas de rayos, atenuando las perturbaciones debidas a pulsos de corrientes derivados de rayos con impacto en puntos cercanos exteriores a la zona de protección directa del DDCE instalado, y absorbiendo los campos electromagnéticos de radiofrecuencia provenientes generalmente de causa exógena (torres de telecomunicaciones próximas, los generados por descarga atmosférica nube-nube, entre otras).

^(W) **Patente Dinnteco:** Spain Reference: P201530389. Starting date: 24.03.2015. Concession date: 05.02.2016; USA Reference: 9.685.775 B2 (14/985 708). Starting date: 31.12.2015. Concession date: 20.06.2017. And other 33 countries with concession or starting dates.

En Defensa, las instalaciones y equipamiento deben responder a criterios de fortaleza, invulnerabilidad y resistencia. Estos criterios se ven atendidos con la protección y seguridad que los DDCE otorgan. Los DDCE son utilizados para proteger instalaciones móviles de telecomunicaciones en asentamientos militares, como protección de antenas, radares, shelters e infraestructuras terrestres; en acuartelamientos, polvorines, torres de control de aeródromos y helipuertos, hangares, puesto de mando y de operaciones, hospitales de campaña, entre otros; también en navíos de la Armada: portaviones, fragatas, transporte, dragaminas,...; en puertos: aprovisionamiento de combustibles, dársenas. Inclusive podrían adaptarse a aviones de transporte, a otros medios aerotransportados y a recursos e infraestructuras energéticas o de apoyo logístico desplegables.

Conviene reflexionar con cifras de la actividad ceráunica terrestre anual que sitúan el número de impactos por rayo en valores superiores a 2.000 millones/año. METEORAGE [1] ha contabilizado del 01.01.2019 al 31.08.2019 la cifra de 1.676.416.877 impactos directos por rayos en la Tierra, y en un día cualquiera –el 01.09.2019- ha registrado 7.701.169 descargas por impacto directo de rayos. Lo que pone en evidencia que no se trata de un tema ocasional o incidental.

El objetivo de esta contribución es múltiple: de los datos de METEORAGE, aportados por concierto con DINNTECO para 8 puntos significativos donde hay infraestructuras críticas protegidas con DDCE 100 instalado, hemos realizado un análisis exhaustivo durante el periodo anual de 2018 y acumulado desde la fecha de instalación de los DDCE y, también, de la intercomparación de los registros históricos anuales consecutivos disponibles, que en algunos puntos alcanzan a 16 años.

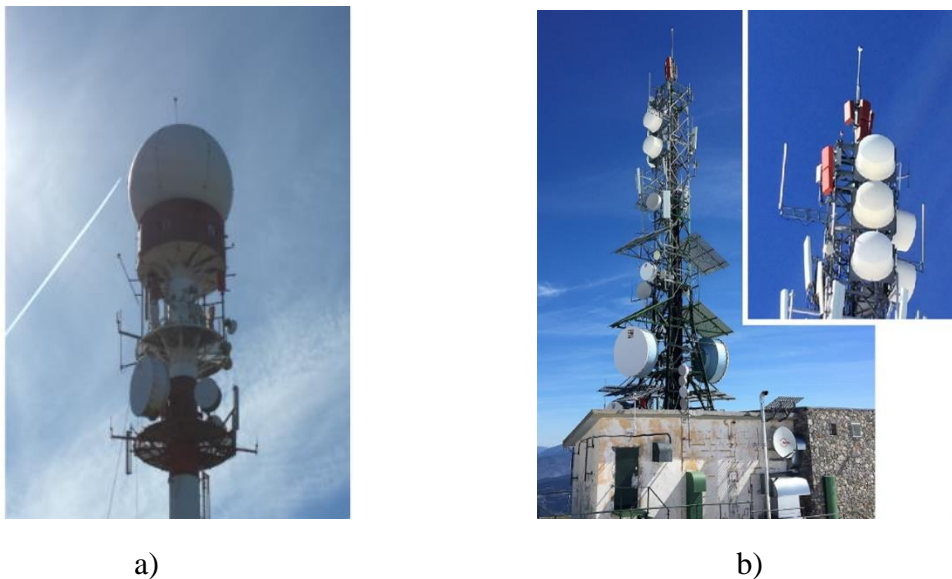


Figura 1. Dos infraestructuras críticas protegidas con DDCE 100: a) Torre Jata de AEMET Radar Meteorológico. Vizcaya, España. b) Torre de Telecomunicaciones CELLNEX. La Masella-Pirineo Oriental. Gerona, España.

Ello permite explorar la posibilidad de inferir un Índice de Eficiencia Protectora –PEI: *Protection Efficiency Index*- para un DDCE 100. En la Figura 1 se muestran dos ejemplos de los puntos significativos de seguimiento por parte de Meteorage que cuentan con protección de un DDCE 100 instalado: torre Jata de AEMET dedicada a servicios de exploración meteorológica por radar y ubicada en el País Vasco, y una torre de telecomunicaciones de CELLNEX en La Masella en el Pirineo catalán.

Así mismo, de las simulaciones numéricas realizadas por Área de Radiofrecuencia del INTA INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial –INTA- situado en Torrejón de

Ardoz, Madrid, bajo encargo de DINNTECO, con ayuda de la herramienta informática HFSS de Ansys [2] y la colaboración de la UCM –Universidad Complutense de Madrid- mediante la herramienta Consol MultiPhysics [3], se ha podido establecer una modelización de la operatividad funcional de los DDCE en cuanto al confinamiento de cargas eléctricas por campos electromagnéticos de radiofrecuencia resonantes dependientes del diseño y materiales utilizados en el desarrollo y fabricación de los DDCE, así como de la distribución del campo eléctrico estático exterior al DDCE en un entorno próximo al dispositivo, participación que resulta fundamental para justificar la movilidad de cargas y su compensación. Finalmente, una aún reciente publicación de ingeniería cuántica por K.D.B. Higgins et al [4] nos ha permitido considerar a los DDCE como dispositivos cuánticos disipativos, sumideros de cargas eléctricas y de campos electromagnéticos de radiofrecuencia [5]. Todo ello se muestra en esta aportación como una explicación de los procesos físicos que justifican la actuación de los DDCE y sustentan su mejora y extensión a nuevos desarrollos en distintos campos y utilidades de aplicación.

2. Índice de Eficiencia Protectora de un DDCE 100

Los datos acumulados desde la instalación de un DDCE en seis infraestructuras críticas de seguimiento por parte de Meteorage hasta el 31.12.2017 están recogidos en una ponencia de DESEi+D 2018 [6] y añadido un punto/entorno más y referidos hasta 31.12.2018 se muestran en [5]. En la actualidad, como se ha dicho anteriormente, son ocho los puntos/entorno de referencia y seguimiento. Los datos facilitados por Meteorage responden a impactos detectados en el punto de instalación de los DDCE –distancia radial 0- que para todos los casos de las ocho instalaciones críticas acusan 0 impactos en todo el seguimiento histórico desde la instalación de los DDCE 100. También se dispone de los impactos a distancias radiales de hasta 100m, en los intervalos de 100 a 300m, 300 a 500m, 500 a 900 m y >900 hasta 2 km, referidos todos al punto de instalación del DDCE en cada uno de los ocho puntos/entorno de seguimiento.

Una media directa de los valores acumulados en cada intervalo, sin discriminación, ni ponderación alguna, señalan que en un entorno de hasta 100m el porcentaje no supera 0,1 %, a pesar de que hay puntos/entorno como Les Pardines con casi 18 años de seguimiento y Torre Jata de AEMET con 10 años desde su instalación, ambas en zonas de gran intensidad cerámica. En la Figura 2 se presenta un diagrama concéntrico que pretende expresar un índice de eficiencia protectora como la diferencia a 100 menos la probabilidad –promedio directo del número de impactos de rayos detectados acumulados en tiempo en los 8 puntos/entornos de seguimiento- para los distintos intervalos concéntricos referidos y normalizados al valor total de impactos de rayos detectados en todo el histórico analizado hasta < 2 km. Este análisis otorga una zona de protección –considerada como un semiesfera de radio 100 m (aunque por simplicidad de refiera a la proyección del área de un círculo de radio 100m) de < 8/10.000, aunque esta zona de protección puede ser extendida a 200m de radio sin incremento de la probabilidad de riesgo en las instalaciones protegidas más recientes (< 4 años), donde los DDCE instalados tienen mejores prestaciones tecnológicas. Sin embargo, un análisis estadístico de las series históricas por intervalo anual normalizadas en cada caso a la totalidad de impactos en cada punto/entorno analizado parece evidenciar una tendencia a la baja del número de impactos de rayos detectados conforme la infraestructura protegida lleva más tiempo contando con la protección de un DDCE. Aunque obvio, es obligado resaltar que es necesario en todo caso que las estructuras protegidas deben tener el mismo potencial eléctrico que el casquete inferior - vástago soporte del DDCE que les protege.

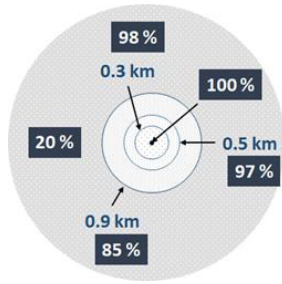


Figura 2. Índice de Eficacia Protectora: PEI -*Protective Efficacy Index*- en un DDCE 100. En número de impacto rayos en % se corresponden con promedios estadísticos obtenidos en 7 puntos geográficos diferentes sobre datos de recuento histórico totales desde la instalación de los DDCEs 12.2018 en función de la distancia al punto de instalación del DDCE sobre la infraestructura protegida.

3. El DDCE como resonador multimodo de radiofrecuencias

El ya referido estudio por simulación realizado por INTA [2] con ayuda de la herramienta ANSY indica que un DDCE presenta 40 modos resonantes en el intervalo de 0,59 a 2,42 GHz. Fuera de este intervalo para el análisis por simulación no se ha encontrado resonancia alguna. La mayoría de estos modos presentan un bajo Factor de Calidad: < 250 . Ahora bien, el referido análisis por simulación no considera las tolerancias de fabricación, ni las desviaciones de montaje y la evolución dimensional por variación térmica (dilataciones y compresiones) que se traducen en incertidumbres $> 3\%$, lo que se corresponde con errores aleatorios que se concretan en un ensanchamiento del perfil espectral de cada modo en un factor 3 a 5 de su ancho de banda de todos estos modos con valores bajos en Q . Por lo que consideramos más representativo que el comportamiento de los DDCE respecto a resonancias de radiofrecuencia está constituido por un fondo continuo sobre el que aparecen dos modos principales destacados que se singularizan: uno principal a 1,70 GHz y $Q \approx 610$ y, otro secundario a 1,153 GHz y $Q \approx 270$. En otro modelo de DDCE analizado –DDCE 50– este reparto apunta a dos modos principales más equilibrados. En ambos modelos analizados la correspondencia con un análisis formal con los diseños geométricos de ambos modelos nos permiten afirmar que el modo principal –el de 1,70 GHz para el DDCE 100– se corresponde bien con la ecuación fundamental de un resonador plano:

$$2nd\nu = c \quad (1)$$

En donde d es la separación interior entre hemisferios del DDCE, n el índice de refracción correspondiente a un plasma de baja densidad ($n \approx 1$), ν la frecuencia (1,70 GHz en DDCE 100) y c la velocidad de la luz en el vacío. A pesar de la fuerte aproximación que ello supone su ajuste para ambos modelos DDCE 50 y DDCE 100 son de $\pm 6\%$. El otro modo considerado de más baja frecuencia se ajusta aún mejor $\pm 2\%$ con la condición de un resonador confocal ($4d \approx \lambda/2$), con λ la longitud de onda asociada a los distintos modos y d las distancias posibles en un DDCE 100. Esto se manifiesta consistente con la proximidad más ajustada de un DDCE con la confocalidad esférica del formato de los modelos analizados. Tanto este segundo modo como la existencia del cuasi-continuo ya indicado se corresponden con órdenes superiores de modos resonantes no axiales, en concreto con orden 2 y 3 respectivamente, y son clara evidencia del carácter disipador de energía por la propia existencia de un cuasi-continuo [7]. Todo ello y los valores del factor de calidad Q son compatibles con distancias locales entre los hemisferios oblicuas y, ambos razonamientos, vienen avalados por las simulaciones de distribución de los campos eléctrico y magnético de los distintos modos analizados. La Figura 3 presenta, como ejemplo ilustrativo, las simulaciones sobre formato DDCE 100 obtenidas para el campo eléctrico (V/m) en dos planos de vista OZ y OX. En ambas se aprecia un campo exterior eléctrico evanescente con un valor significativo en un entorno próximo de hasta 60 cm para el DDCE 100. En la Figura 3.a se aprecia en la dirección OX en la superficie (borde exterior) dos zonas de mayor realce.

Las simulaciones dinámicas en el tiempo y en 3-D muestran la capacidad para confinar cargas en el espacio durante intervalos temporales que hemos estimado en $4/9$ del periodo [5].

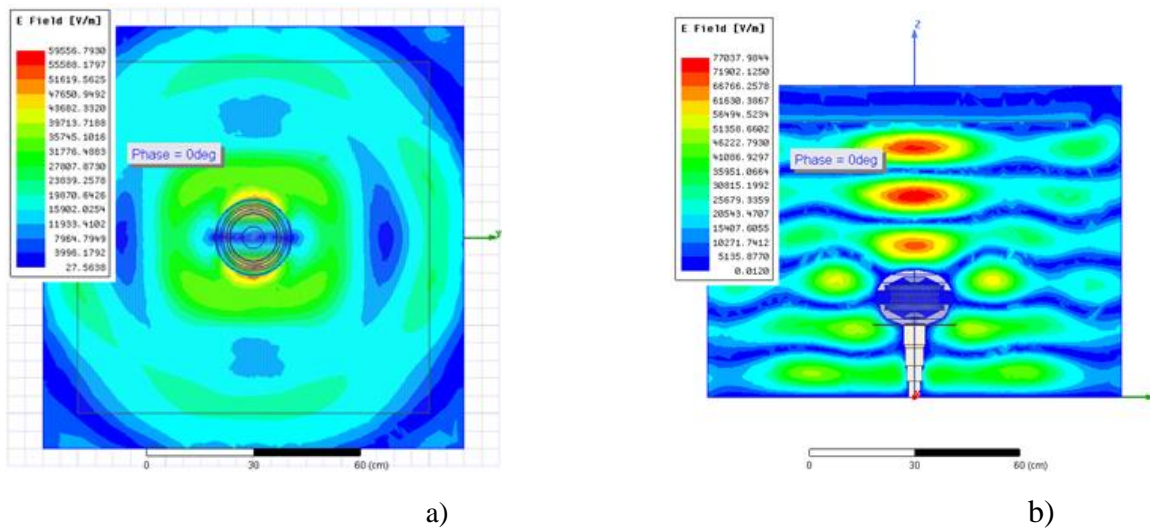


Figura 3. Simulación sobre un formato de DDCE 100 del campo eléctrico (V/m) de radiofrecuencia resonante a 1,153 GHz: a) en vista eje OZ (plano XY) b) en vista eje OX (plano YZ).

También pudiera darse las circunstancias de establecimientos temporales de los llamados resonadores “whispering gallery”, cuyo análisis requiere tal vez un más detenido análisis cuantitativo y, tal vez, la cooperación del campo magnético estático. En cualquier caso, parece intuitivo la capacidad de los DDCE para confinar cargas eléctricas negativas (electrones e iones $-$) y cargas eléctricas positivas (“huecos” e iones $+$) en su entorno próximo y ambos hemisferios, justo en las proximidades de la unión con la banda anular de material dieléctrico aislador.

La Figura 4 muestra estas posibles zonas de confinamiento que hemos representado sobrepuestas sobre una fotografía de un DDCE 100, diferenciando la polaridad y la extensión previsible de confinamiento por los “gajos” en color beige (cargas negativas) y azul (cargas positivas).



Figura 4. Representación gráfica sobre fotografía de un DDCE 100) de la distribución espacial de cargas eléctricas confinadas por campos resonantes de radiofrecuencia evanescentes: en beige zonas de cargas negativas, en azul zonas de cargas positivas.

Conviene indicar que la movilidad de cargas positivas (iones $+$) es difícil de justificar como una migración por conducción desde la puesta a tierra del hemisferio o casquete inferior debido al propio impedimento estérico de su estructura molecular; sin embargo, cabe considerarlos porque eventualmente pudieran ser captados del propio medio ambiente o de una lenta migración externa a los medios conductores propiciada y mantenida por el campo eléctrico estático que se establece en un DDCE. Igualmente, la conexión a tierra del hemisferio inferior, el vástago-soporte y el cable conductor que lo deriva a tierra todos en equipotencial sí que transportaría a tierra cualquier carga eléctrica negativa por lo que más bien puede hablarse de ausencia de cargas negativas –“huecos”- al igual que se entienden en medios semiconductores. De hecho es que un DDCE puede asociarse a un dispositivo

de unión p-n como en física de semiconductores, pero donde el “gap” energético es de mucha menor energía y asociado al ámbito de las radiofrecuencias (~ 0,5 a 2 GHz).

4. Los DDCE como dispositivos cuánticos disipadores

Es un hecho empírico comprobado que los DDCE son capaces de atenuar campos de radiofrecuencias y derivar a tierra pulsos de corriente que eventualmente pudieran presentarse en su entorno próximo, provenientes de agentes atmosféricos por derivación por tierra de caídas de rayos y por influencia de rayos nube-nube, o por cualquier causa exógena (por ejemplo: torres de telecomunicaciones próximas, según mostramos en la prueba conceptual que sigue).

Recientemente, Dinnteco ha llevado a cabo una prueba experimental real en campo que prueba la capacidad protectora de los DDCE para atenuar la radiofrecuencia que induce fuertes perturbaciones en una infraestructura conductora de grandes dimensiones y de manejo directo por humanos. La prueba se realizó en noviembre de 2018 en el muelle de la terminal de Nagoya United Container Co. Ltd. en Tomihama, Tomi-shi, Aichi en Japón, donde una gran grúa de carga/descarga de contenedores. La protección se dispuso con 4 unidades de DDCE 100 Plus instaladas en 4 puntos diferentes de la grúa y los 4 conectados a la misma red de toma a tierra. Antes de la protección con los 4 DDCE se detectaban en distintos puntos de la grúa diferencias de potencial que tomaban valores entre 50 a 900 V, habiéndose medido picos de hasta 1.200 V. En estas medidas de potencial eléctrico la intensidad de corriente iban desde 5,31 a 39,22mA. Ello producía molestias en el personal que utilizaba y prestaba servicios con la grúa, molestias impedían su labor a pesar de ir con protección eléctrica individual. Se estima que la causa origen del problema está ligado a la presencia de la torre NHK de telecomunicaciones próxima al muelle del terminal de carga/descarga citado. La Figura 5.a da cuenta de un registro de señal en escala de 100 V/división habitual de los registrados. Junto a él en la Figura 5.b puede apreciarse el registro obtenido en los mismos puntos de toma una vez debidamente instalados los 4 DDCE 100 Plus. En esta circunstancia las medidas de potencial eléctrico se reducían a 50 – 70 V con intensidades de corriente eléctrica desde un mínimo de 0,94mA a un máximo de 10,94 mA. La instalación en la gran grúa del muelle no afectó a los servicios de comunicaciones establecidos por la torre NHK.

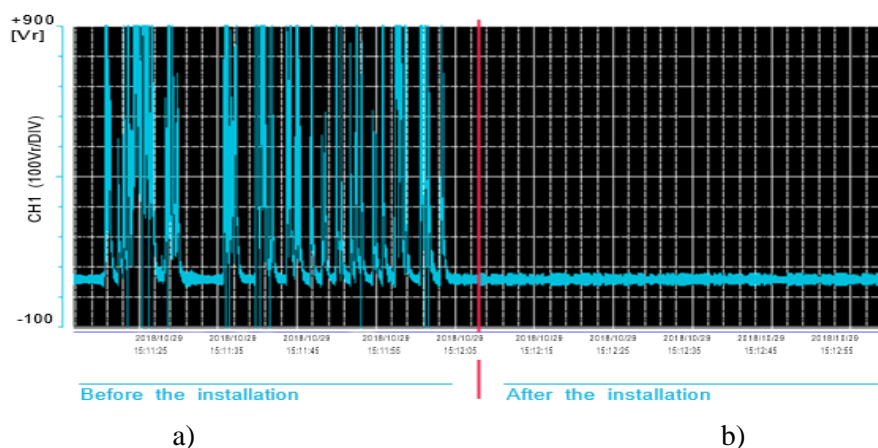


Figura 5. Registro de medida de diferencia de potencial eléctrico V(100V/división) tomada en el punto nº 4, uno de los 4 diferentes puntos críticos seleccionados de la gran grúa para carga/descarga de contenedores en el muelle Nabeta de Nagoya United Container Co. Ltd. situado en 5-1, Tomihama, Tomi-shi, en Aichi. Japón: a) antes de instalar DDCE y b) con DDCE instalado.

Ahora bien, estos resultados de validación experimental del comportamiento protector de los DDCE frente a perturbaciones de radiofrecuencia plantean cuál es proceso físico que justifica la atenuación

de los campos de radiofrecuencia por un DDCE. Tratándose de un dispositivo selectivo multimodal resonante, como lo son los sistemas atómicos, moleculares, o las estructuras de unión p-n en resonante, cabe pensar en mecanismos interactivos radiación-materia de naturaleza cuántica, en los que el modelo de dos niveles en sistemas en equilibrio [7] tan buenos resultados y predicciones han dado. La potencia electromagnética absorbida depende de la acumulación de cargas en el tiempo en los dos estados y, en el equilibrio, la aplicación a este caso de la distribución de Boltzman para estas poblaciones señala $N_-/N_+ = 1.000221$; que son prácticamente iguales, por lo que procesos de emisión estimulada y absorción se compensan de manera inmediata, y no darán lugar a mecanismo disipativo. Solo un proceso de super-absorción cooperativa, inverso de la super-emisión cooperativa espontánea introducido por R.H. Dicke [9]. Como se ha señalado en la Introducción de esta contribución un artículo reciente de K.D.B. Higgins et al. [4] desarrollan en el marco de la ingeniería cuántica un proceso de super-absorción cooperativa espontánea que es dependiente del cuadrado de la población del estado de más baja energía y no de la diferencia de poblaciones. Las condiciones físicas respecto a la extensión espacio/temporal de los pulsos de radiofrecuencia a absorber y las extensión espacio/temporal de los pulsos, señaladas para un proceso de super-absorción en [4] se satisfacen, según se evalúa en [5].

Sin embargo, al igual que una unión p-n en un fotodiodo de avalancha se requiere una movilidad de cargas que los campos de radiofrecuencia -solo confinadores- no resuelven, pero hay que tener en cuenta la presencia casi mantenida en un DDCE de un campo eléctrico estático (como en un condensador en régimen estático) que sí que es capaz de promover movilidad de cargas y promover la compensación de cargas electrón-hueco, o con generalidad positivas y negativas (considerando los iones +/-). La Figura 6 muestra la distribución en entorno exterior próximo a un DDCE 100 simulada por Consol MultiPhysics. Su dimensionado espacial cubre con creces las zonas de confinamiento de cargas.

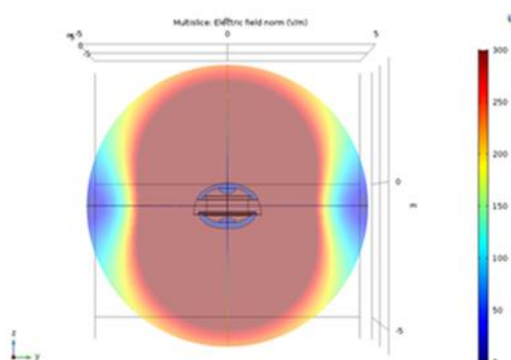


Figura 6. Distribución espacial de campo eléctrico estático externo a un DDCE 100.

5. Conclusiones

Se ha establecido un Índice de Eficiencia Protectora – PEI (Protective Efficiency Index)- que permite asignar una cobertura de seguridad facilitada por un DDCE 100 y referida a una proyección de radio $< 200\text{m}$ centrada en el punto de instalación. El análisis de las series históricas de datos de Meteorage permite intuir una cierta tendencia a mayores PEI conforme el tiempo de instalación aumenta.

Finalmente la actuación conjunta y seriada de procesos de carga estática de un DDCE, seguido del establecimiento transitorio de campos electromagnéticos resonantes facilita en el exterior próximo del

DDCE confinamiento próximo e independiente para las cargas negativas/positivas. La presencia del campo eléctrico estático propicia la movilidad de estas cargas en sentido favorable a su compensación, como en modelo “excitones” (pares electrón-hueco), dando origen a procesos de super-absorción, dependiente del cuadrado del número de excitones, lo que justifica en comportamiento disipativo – absorbente de radiofrecuencia-.

Intuitivamente podríamos señalar que esta movilidad acotada en el espacio y el tiempo de las cargas de distinto signo en sentido convergente podría considerarse como un “puente de descarga efectivo” que se establece como “gajos espaciales” de duración temporal finita en zonas determinadas y que realizan la descarga eléctrica de manera controlada y acompañada de absorción de energía electromagnética de campos de radiofrecuencia.

Agradecimientos Los autores expresan su agradecimiento al Instituto de Tecnología Aeroespacial – INTA- su colaboración en las simulaciones de cálculo numérico realizadas por el Departamento de Equipos y Sistemas, en concreto, a Borja Plaza Gallardo por excelente y diligente labor, también a David Poyatos Martínez y Daniel López Sanz por su interés, seguimiento y facilidades prestadas. A Hala Kamal Abd El Hady, de Ain Shams University, El Cairo. Egipto por su apoyo en las simulaciones con Consol MultiPhysics.

Referencias

1. METEORAGE: French company, based in Pau (France): covers information and statistical data services on storms in a large part of Europe. It uses VAISALA base equipment. Joint Meeting of CIMO Expert Team on Operational Remote Sensing Technology (ET_ORST). Oct. 2015. Vaisala, 12.11.2015. <https://www.meteorage.com/f>
 2. ANSYS: HFSS: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- Dinnteco International. Report INTA on Simulation of radiofrequency fields & Tests. Torrejón de Ardoz, Spain. February 2019.
3. CONSOL MultiPhysics: <https://www.comsol.com/>
 4. Higgins, K.D.B.; Benjamin, S.C.; Stace, T.M.; Milburn, G.J.; Lovett, B.W., Gauger, E.M. *Super-absorption of light via quantum engineering*. 2014. Nature Comm. 5, pp 4705-4711.
 5. Bernabéu, E.; Maldonado, J.; Saenz, M A. *An -ECCD- Electronic Charge Compensation Device as a Quantum Dissipative System*. 2019. J. Applied Sc. To be published. Invited paper.
 6. Maldonado, J.; Kamal Abd El Hady, H.; Saenz, M.A.; Bernabéu, E. *Avances y adecuación de dispositivos DDCE para la protección ante descargas eléctricas atmosféricas y pulsos electromagnéticos de infraestructuras y equipamiento en Defensa*. DESEi+D 2018. Valladolid. Ponencia 217.
 7. Fano, U. *The Theory of anomalous diffraction gratings and quasi-static waves on metallic surfaces (Sommerfeld's waves)*. 1941 J. Optic. Soc. Am. **31**, pp213-222. Cita más reciente y excelente por la descripción hecha: Cohen-Tannoudji, C.; Dupont-Roc, J.; Grynberg, G. 1992 *Atom-Photon Interaction*. John Wiley & Sons. New York, USA. 1992. pp 61-66.
 8. Einstein A: Zur Quantentheorie der Strahlung. 1917 *Physikalische Zeitschrift* 18, pp. 121-128. Cita mas actual: Saleh, B.E.A.; Teich MC: *Fundamental of Photonics*. John Wiley & Sons. Hoboken (New Jersey), 2007. Cap. 13 pp. 482-511, Cap. 16 pp. 660-677 y Cap. 18 pp. 767-775.
 9. Dicke, R.H. *Coherence in spontaneous radiation processes*. 1954 Phys. Rev. 93, pp. 99-110.