

Análisis de los impactos directos de descargas eléctricas atmosféricas en tanques de almacenamiento de hidrocarburos con techo flotante interno con domo geodésico

Analysis of the direct impacts of atmospheric electric discharges on hydrocarbon storage tanks with internal floating roof with geodesic dome

D. Marin¹, C. Younes², J. Montaña³, J. Herrera⁴

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. dmariny@unal.edu.co

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación. Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales. cyounesv@unal.edu.co

³ Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. johny.montana@usm.cl

⁴ Facultad de minas universidad nacional de Colombia sede Medellín. jherreram@unal.edu.co

RESUMEN

En este artículo se analiza el comportamiento de los impactos directos de las descargas eléctricas atmosféricas en los tanques de almacenamiento de hidrocarburos de tipo vertical atmosféricos, de techo flotante interno con domo geodésico, para la actividad eléctrica atmosférica en Colombia. Se hace una revisión de la norma API-RP 545 de 2009, revisando las consideraciones particulares para este tipo de elementos de almacenamiento y contextualizando las recomendaciones de la norma al caso colombiano. Con base en las consideraciones anteriores se puede elaborar una propuesta de ingeniería para considerar los tanques de techo flotante interno como estructuras auto protegidas bajo ciertas consideraciones particulares de cada tanque.

PALABRAS CLAVE: Impactos directos, domo geodésico, techo flotante interno, estructura auto protegida, energía de ignición.

ABSTRACT

This paper analyzes the behavior of lightning direct discharges on the atmospheric vertical hydrocarbon storage tanks, with internal floating roof with geodesic dome, for the Colombian electrical atmospheric activity. A review of API-RP 545 of 2009 is carried out, reviewing the particular considerations for this type of containers and contextualizing the recommendations of the standard to the Colombian case. Based on the foregoing considerations, an engineering proposal may be developed to consider internal floating roof tanks as self-protected structures under certain particular considerations of each tank.

KEYWORDS: direct impacts, geodesic dome, internal floating roof, self-protected structure, ignition energy.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia es un país tropical con unas condiciones particulares en cuanto a la actividad atmosférica, reportando una gran cantidad de rayos efectivos a tierra [1]. Al igual es un país industrializado en cuanto a recursos petroleros se refiere y en pleno desarrollo de campos de explotación, producción, transporte y

modernización de refinerías. Dentro de los procesos operativos de la cadena de valor de la producción petrolera se utilizan en gran manera recipientes de almacenamiento de sustancias inflamables y combustibles[2] estos recipientes son diseñados en función de las necesidades propias del proceso y de acuerdo a la tecnología desarrollada disponible en el mercado, algunos de los recipientes más comunes son

los de tipo vertical y a presión atmosférica; los más usados son los tanques de techo fijo, los tanques de techo flotante externo y los tanques de techo flotante interno, los de techo flotante interno se subdividen en tanques de techo cónico y tanques de techo con domo geodésico. En este artículo se pondrá especial atención en los tanques de techo flotante interno con domo geodésico, analizando el efecto de los impactos directos de las descargas eléctricas atmosféricas revisando la norma API RP-545 de 2009 [3] en el contexto de actividad atmosférica para Colombia.

Estudios de análisis de incendios en tanques de almacenamiento de hidrocarburos [4] indican los históricos y las altas probabilidades de incendios que se presentan ante el impacto directo de un rayo en un tanque que almacena hidrocarburos, considerándose los más propensos a un incendio los tanques de techo flotante externo.

En otro aparte en estos días existe un desafío en el sector de hidrocarburos en Colombia, en temas de análisis de riesgo y sistemas de protección contra descargas atmosféricas para tanques de almacenamiento de hidrocarburos buscando puntos de equilibrio de costo beneficio optimizando los sistemas de análisis de riesgos y evaluando las necesidades de protección adicional de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

En este artículo se analiza la norma API RP -545 de 2009 en relación a los tanques de almacenamiento de hidrocarburos de techo flotante interno se revisa ante la actividad atmosférica del caso colombiano y se dan unas recomendaciones de análisis para considerar el tanque de techo flotante interno como estructura de bajante natural o auto protegido, bajo las premisas de análisis. Utilizando una herramienta computacional se estimaran los campos eléctrico y magnético distribuidos en el domo geodésico del tanque al igual que la posible energía transferida en la superficie del tanque ante un impacto directo de un rayo.

2. REVISIÓN DE LA RECOMENDACIÓN TÉCNICA API-RP-545.

2.1. Análisis general

El American Petroleum Institute, para el año 2009 saca a circulación el producto API-RP 545 (**Recommended Practice for Lightning Protection of Aboveground Storage Tanks for Flammable or Combustible Liquids**)[3] cuyo principal objetivo era entregar unos lineamientos para la valoración y protección de tanques de almacenamiento de hidrocarburos, haciendo un especial énfasis en los tanques de techo flotante externo debido a que son los más susceptibles a incendios por impactos directos e indirectos de los rayos, al igual se presentan unas recomendaciones particulares para

tanques de techo fijo y tanques de techo flotante interno con domo geodésico. Esta recomendación técnica presenta una gran acogida en el sector de los hidrocarburos tomándose inclusive como norma general y obligatoria para los diseñadores de sistemas de protección contra descargas atmosféricas en tanques de almacenamiento de hidrocarburos.

2.2. Análisis de los tanques de techo flotante interno con domo geodésico.

Los tanques de techo flotante interno con domo geodésico son recipientes que almacenan materiales inflamables normalmente, su cuerpo vertical de paredes está unido a un techo en domo fabricado en aluminio e internamente tiene una membrana apoyada en una estructura horizontal la cual es considerada como el techo interno del tanque el cual sube o baja dependiendo del nivel del líquido almacenado. La norma presenta un escenario para el impacto directo en el techo del tanque (domo construido en material de aluminio). En el numeral 4 de la norma API-RP-545 [3] se presentan las consideraciones para la protección de los tipos de tanques específicos donde se estima el tanque de techo flotante interno con domo geodésico así:

- Es probable que en las zonas de los venteos existan vapores inflamables, lo que ante el impacto de un rayo pueden causar un incendio.
- Elementos conductores entre el techo flotante interno y la pared del tanque no son necesarios.
- Tanques que contengan materiales inflamables con baja presión de vapor [2] con buen mantenimiento de techos los techos internos, lo cual permita una buena hermeticidad entre el techo y las paredes, evitando escape de vapores al volumen comprendido entre el techo flotante y el domo geodésico, no requieren protección adicional.

En conclusión a los puntos citados del **a** al **c**, y revisando el anexo B de la API-RP 545[3], se da un buen parte histórico del comportamiento de los tanques de techo flotante interno con domo geodésico ante las descargas eléctricas atmosféricas dejando todo el foco de análisis al tema de la posible presencia de vapores ante las siguientes circunstancias operativas y de diseño:

- Presencia de vapores inflamables en concentración proporcional a la cantidad de oxígeno mínima para que pueda ocurrir un incendio continuo. Estos deben de ser controlados por el techo flotante interno.
- Malas prácticas operativas como lo son las operaciones de sobrellenado, excediendo los límites de diseño de nivel.
- Fallas que se puedan dar en el sistema mecánico de flotación, frenado y/o des-

alineamiento de los sellos en relación con la pared del tanque.

- d. Mala ventilación en las áreas de presencia del tanque, hace referencia a los tanques diseñados bajo estándar API-650 apéndice H [5].

En relación al análisis anterior la norma API-RP 545 de 2009, hace énfasis en que no hay necesidad de protección adicional de un tanque de techo flotante interno con domo geodésico considerando las condiciones de un correcto diseño, un adecuado montaje, condiciones operativas favorables para el correcto desempeño del tanque especial cuidado en los elementos móviles como lo son el techo flotante, y el adecuado mantenimiento en el tiempo para conservar las condiciones iniciales de diseño del tanque.

Para condiciones de diseño de sistemas de protección la norma deja en evidencia una brecha entre sí se puede considerar o no el tanque de techo flotante interno como estructura auto protegida (bajante natural) en varios aspectos:

1. No se definen valores cuantitativos de la presión de vapor definida como “baja”, para caracterizar los tanques con el tipo de sustancia que almacena.
2. No presenta medidas de los espesores de techo, para considerarlos como bajantes naturales, simplemente hace el comentario del comportamiento del techo como una jaula de Faraday.
3. No especifica consideraciones particulares del efecto del rayo ante un impacto directo en los diferentes tipos de materiales que pueden presentar los tanques en el techo.
4. No se presenta un procedimiento de análisis para determinar si la estructura se puede considerar auto protegida o requiere sistemas de protección adicional.
5. Queda supeditado el análisis de protección a variables que dependen de factores humanos en el tiempo. Factores de operación y mantenimiento.

Con base en lo anterior se procede al análisis del comportamiento del impacto directo de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos de techo flotante interno con domo geodésico.

2.3. Revisión en el contexto colombiano

Los industriales del sector Petroquímico, normalmente asignan a firmas de consultoría especializada para realizar los análisis de riesgo y los diseños de los sistemas de protección contra descargas eléctricas atmosféricas en los parques de almacenamiento de productos inflamables y combustibles. Para realizar las evaluaciones de riesgo y posterior a esto los diseños de

los sistemas de protección contra descargas atmosféricas, se hace uso de las normativas nacionales e internacionales que permitan tener los lineamientos ajustados a los diseños de ingeniería, para el caso a analizar en este artículo se hace referencia a la norma API-RP 545 de 2009, de preferencia por los industriales del sector debido a que hace un especial énfasis en la protección de tanques de almacenamiento ante descargas eléctricas atmosféricas. Con base en la apreciación anterior en este artículo se va a revisar los criterios de la API-RP 545 de 2009, para considerar los tanques de techo flotante interno como estructuras auto protegidas, para el caso de la actividad atmosférica en Colombia. Lo anterior en justificación necesaria para determinar los sistemas de evaluación en un punto óptimo técnico y económico.

Para el caso colombiano al evaluar el riesgo, diseñar los sistemas de protección y considerar estructuras autoprotegidas, se presenta una brecha de incertidumbre en relación a los tanques de techo flotante interno con domo geodésico por las razones expuestas en el numeral 2.2.

3. MODELADO DEL IMPACTO DIRECTO DE UNA DESCARGA ATMOSFÉRICA EN UN TANQUE DE TECHO FLOTANTE INTERNO.

3.1. Tanque de almacenamiento de hidrocarburos de techo flotante interno con domo geodésico.

En la figura 1. Se presenta la vista frontal de un tanque de techo flotante interno, donde se hace especial énfasis en el techo tipo domo donde se realizará el análisis del comportamiento del techo al momento de un impacto directo de un rayo.

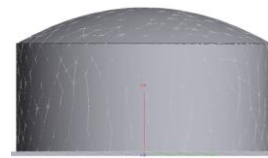


Figura 1. Descripción de tanque de almacenamiento con domo geodésico, visto de perfil. **Fuente.** Adaptación desde el software FEKO [6]

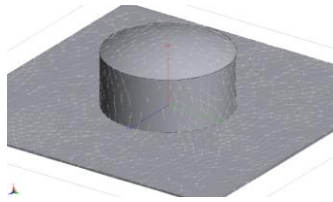
Para realizar el análisis de el impacto directo de un rayo en el tanque de techo flotante interno se realizarán todos los cálculos numéricos solo considerando el impacto de un rayo en el techo del tanque, punto más probable en que se de el impacto directo[3].

En la tabla 1. Se indican los parámetros constructivos típicos del domo de un tanque de techo flotante interno.

Tabla 1. Configuración del domo geodésico del tanque.

Materiales del domo geodésico[aluminio]		
Estructura	Material	Espesor[mm]
Estructura en I doble.	Aluminio	9.525 mm
Paneles triangulares	Aluminio	1.27 mm

Fuente. Ateco tank technologies engineering service co.

**Figura 2.** Formación del domo geodésico, vista isométrica.

Fuente. Adaptación desde el software FEKO [6].

En la figura 2. Se muestra la formación en malla del techo tipo domo geodésico, para el análisis del impacto directo de un rayo en el techo geodésico del tanque de techo flotante interno se tienen las siguientes premisas de evaluación:

1. Solo se tendrá en cuenta para el análisis las estructuras que soportan el techo y las láminas de cerramiento, ambos materiales en aluminio y con los espesores indicados en la tabla 1.
2. Para el análisis del impacto directo se realizara en un diámetro de techo típico, no es relevante para este estudio diámetros particulares de techos y tanques.
3. Se asume la probabilidad más alta de impacto en las aristas formadas entre el techo y la pared del tanque [3].
4. El tanque va a modelar en una superficie conductora perfecta.

El numeral 4, hace referencia a que los tanques de almacenamiento reposan sobre el suelo [a contacto] y al igual están puestos al sistema de puesta a tierra de baja resistividad por medio de conductores de cobre [3].

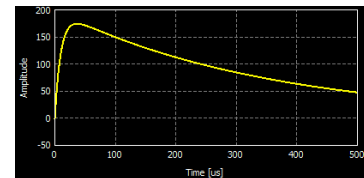
3.2. Modelo de la magnitud de la corriente del rayo

De acuerdo a la API-RP 545, se tiene una forma de onda típica de impulso de la corriente de la descarga atmosférica. Teniendo en consideración que normalmente los parques de tanques donde se almacenan materiales inflamables y combustibles se consideran áreas clasificadas [7] y son consideradas como NPR(nivel de protección contra rayos) tipo I donde la magnitud de la primera descarga se estima de 200kA, Tanto en la API-RP 545 como la NTC-4552-1[1].

Para el analisis del impacto directo de un rayo en tanque de almacenamiento de hidrocarburos de techo flotante interno se procedera a modelar la magnitud de la primera corriente de retorno utilizando un modelo de ingeniería [8] ecuación (1).

$$I(t) = I_0 [e^{-at} - e^{-bt}] \quad (1)$$

Donde I_0 es la magnitud de la corriente constante y a , b , son constantes de tiempo en segundos.

**Gráfica 1.** Forma de onda modelada con la ecuación 1.

Fuente. Adaptación desde el software FEKO [6].

Para el analisis del comportamiento del impacto directo del rayo en el techo del tanque y determinar los valores de \mathbf{E} , \mathbf{B} , \mathbf{P} (campo eléctrico, magnetico y vector de poynting), hace necesario resolver las ecuaciones de maxwell [9]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (5)$$

Y se cumplen las siguientes relaciones;

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (7)$$

Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell para el caso particular de este artículo se desarrollo por medio de analisis numerico del metodo de las diferencias finitas FDTD(Finite difference time domain).

Según Baba [10], el metodo de las diferencias finitas se basa en un procedimiento simple presentando una programación sencilla, tiene capacidad de analizar geometrias complejas y no homogeneas, puede incorporar elementos no lineales al igual que puede desarrollarse en el dominio del tiempo y la frecuencia.

La ley de ampere queda expresada:

$$\begin{aligned}\nabla \times H^{n-\frac{1}{2}} &= \varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + J^{n-\frac{1}{2}} \\ &= \varepsilon \frac{\partial E^{n-\frac{1}{2}}}{\partial t} + \sigma E^{n-\frac{1}{2}}\end{aligned}\quad (8)$$

Donde:

E= la intensidad de campo eléctrico[V/m].

H= la intensidad de campo magnético[A/m].

J = la densidad de corriente[A/m²].

σ = la conductividad eléctrica[S/m].

J = σE = la ley de ohm.

ε = la permitividad eléctrica[F/m].

$n - \frac{1}{2}$ = son los pasos numéricos de tiempo.

La ley de Faraday queda expresada:

$$\nabla \times E^n = -\mu \frac{\partial H^n}{\partial t} \quad (9)$$

Donde:

E= la intensidad de campo eléctrico[V/m].

H= la intensidad de campo magnético[A/m].

μ = la permeabilidad magnética[H/m].

n = son los pasos numéricos de tiempo.

Para este artículo se desarrollo el modelo de la descarga de retorno, asignando un impacto directo en el techo del tanque y calculando los campos eléctricos, magnéticos.

3.3. Descargas eléctricas atmosféricas en superficies metálicas.

Cuando un rayo impacta una superficie metálica esta se puede perforar, dado los fenómenos térmicos, magnéticos, acústicos y mecánicos, esto se da cuando el rayo cambia de medio(del aire a una superficie metálica), pudiendo llevar el material a su temperatura de fusión Cooray [11], Chemartin, Lalande [12], Kostogorova [13].

Según Cooray [11], se tienen las siguientes relaciones para determinar la superficie de fusión en un material metálico impactado por un rayo:

$$W = QV_c \quad (10)$$

$$W = R \int_0^{t_d} i^2(t) dt \quad (11)$$

$$V = \left(\frac{W}{\gamma}\right) \frac{1}{c_w \theta_s + c_s} \quad (12)$$

Donde:

W=energía convertida en calor[w]

Q = total de la carga transferida en la descarga del rayo[C].

i = corriente[A]

t_d = tiempo de duración de la descarga[s]

V = Volumen metálico que se funde[m³].

V_c = tensión de cátodo

Tabla 2. Parámetros del aluminio para estimar el volumen de fusión por una descarga atmosférica [11].

Parámetros del aluminio					
γ	θ_s	c_s	c_w	ρ	α
2700	685	397×10^3	908	29×10^{-9}	4×10^{-3}
kg/m ³	°C	J/kg	J/(kg K)	Ωm	1/K
Densidad	Temperatura de fusión	Energía específica de fusión	Calor específico		

Fuente. Vernon Cooray (auth.)-An Introduction to Lightning-Springer Netherlands (2015).

Para considerar los tanques de almacenamiento analizados en este artículo, como estructuras auto protegidas, se estimaran los valores de volumen de fusión del aluminio utilizado en el domo geodésico tomando en referencia los parámetros de la tabla 2. Al igual se tiene como tiempo de duración $t_d=350\mu s$ [8], y según Cooray [11] el área del canal del rayo se estima en $0.0314m^2$.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

En las figuras 4, 5, se indican los resultados obtenidos en el software de electromagnetismo computacional FEKO. Y en la tabla 2 se resumen los valores de las magnitudes obtenidas.

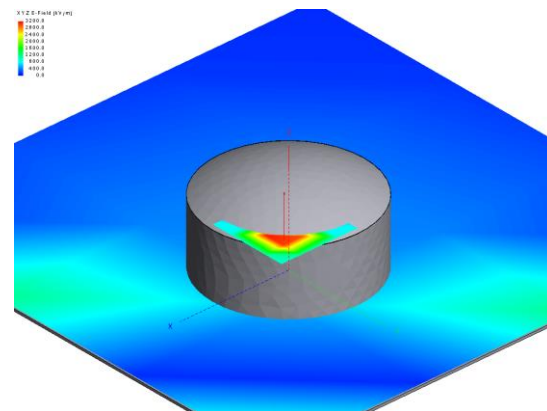


Figura 4. **E**= la intensidad de campo eléctrico[kV/m], vista isométrica (punto de impacto del rayo). **Fuente.** Adaptación desde el software FEKO [6].

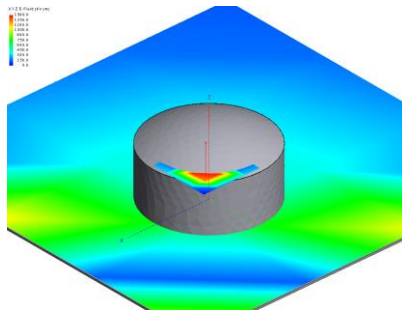


Figura 5. H = la intensidad de campo magnético[kA/m]. Vista isométrica (punto de impacto del rayo). **Fuente.** Adaptación desde el software FEKO [6].

Tabla 3. Resultados de campo Eléctrico, Magnético y Vector de poynting. (En el punto de impacto)

	Resultados (E,B,P)		
	Campo Eléctrico(kV/m)	Campo Magnético(KA/m)	Vector de Poynting(kW/m2)
max	2800	5.5	3.5 e 6
min	2400	4.5	3.2 e 6

Fuente. Elaboración propia, resultados software FEKO. Con base en los resultados de la tabla 3, y las relaciones del numeral 3.3 se pueden calcular los volúmenes de fusión. Registrados en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de volúmenes de fusión en el punto de impacto.

	Volumen de fusión del aluminio en el punto de impacto directo del rayo(350μs).		
	(kW/m2)	(J/m2)	$\bar{U}(m^3)(mm^3)$
max	3.5 e 6	1225	(1.12 e-10)(0.112)
min	3.2 e 6	1120	(1.03 e-10)(0.103)

Fuente. Elaboración propia, resultados software FEKO.

Tomando los valores constructivos del domo geodésico registrados en la tabla 1. Y en comparación con la tabla 4 volumen de fusión, se puede apreciar lo siguiente: Para un volumen de los paneles triangulares de $(1mm \times 1mm \times 1,27mm) = 1,27mm^3$, para el volumen de fusión máximo de la tabla 4. $0,112mm^3$ este volumen de fusión representa un 8.8% para una perforación en una superficie de $1mm^2$ lo cual no es un porcentaje significativo en relación a toda la superficie total de un techo geodésico de un tanque. Menos significativo aún para la estructura autosoportada en doble I con espesor de 9.525 mm.

4.1. Conclusiones

En este artículo se estudio el impacto directo de un rayo, de 200kA de amplitud, sobre el techo de un tanque de

almacenamiento de hidrocarburos de techo flotante interno con dome geodesico, en aluminio, autosoportado y a presión atmosférica. Se tienen las siguientes conclusiones:

1. Según API-RP-545 de 2009, los tanques con domo geodesico tienen buen comportamiento como una jaula de faraday y se pueden considerar autoprottegidos si los materiales inflamables o combustibles almacenados presentan una baja presión de vapor. Según el estudio analizado en este artículo el tanque de techo flotante interno se puede considerar como estructura autoprottegida ya que el volumen de fusión calculado no es significativo comparado con la superficie total del techo de un tanque típico, con la consideración de que el material almacenado se acumula en la superficie del techo flotante interno.
2. El comportamiento de jaula de faraday del conjunto domo geodésico paredes del tanque, presenta valores de volumen de perforación de $0.112mm^3$ máximo y $0.103mm^3$ mínimo, lo cual no es un orificio significativo para que material plásmico del rayo pueda ingresar al interior del tanque y alcanzar la energía de ignición en caso de estar presente en la atmósfera interna del tanque materiales inflamables (el tanque esta a presión atmosférica).
3. El modelo del tanque de almacenamiento en el software FEKO, se realizó conectando el tanque de almacenamiento a una superficie final altamente conductora (simulando la conexión del tanque a un sistema de puesta a tierra de baja resistividad), lo cual tiene una incidencia con el cálculo de la energía de transferencia en el punto de impacto Tabla 3,4 Para una magnitud de corriente de 200kA, comparado con los valores de carga para estimar la energía transferida en el punto de impacto indicados en el anexo A de API-RP-545 de 2009.

4.2. Recomendaciones

Para futuros trabajos de investigación en la tematica de este artículo se tienen las siguientes recomendaciones:

1. Realizar un estudio para tanques de techo flotante interno con techo conico en acero al carbono identificando el volumen de fusión para un impacto directo en las aristas del techo y las paredes.
2. Se recomienda realizar un estudio de volumen de fusión para tanques de techo flotante interno considerando el debilitamiento de el material(aluminio) por el paso del tiempo y los agentes agresivos externos.
3. Se recomienda realizar estudios de los efectos indirectos en otros tanques por la radiación electromagnetica (E, B, P) producto de un impacto de un rayo en un tanque adyacente.

5. REFERENCIAS

- [1] Protección contra descargas eléctricas atmosféricas(rayos), NTC 4552-1, 2008.
- [2] Flammable and combustible liquids code, NFPA 30, 2015.
- [3] Recommended practice for lightning protection of aboveground storage tanks for flammable or combustible liquids, API-RP-545, 2009.
- [4] James I. Chang, Cheng-Chung Lin, “A study of storage tank accidents”, Journal of loss in the process industries, vol. 19, pp. 1-9, 2006
- [5] Welded tanks for oil storage, API standard 650, 2013.
- [6] Atef Z. Elsherbeni, Payam Nayeri y C. J. Reddy, *Antenna Analysis and Design Using FEKO Electromagnetic Simulation Software*, 1ª ed. Londres, UK: by SciTech Publishing, 2014, cap 2, pp 7-39
- [7] Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Division 1 and Division 2, API-RP-500, 1997.
- [8] Vernon Cooray, *Lightning Electromagnetics*, 1ª ed. Londres, UK: The Institution of Engineering and Technology, 1 ed 2012, cap 3, pp 231-259
- [9] Nathan Ida, *Engineering Electromagnetics*, 3ª ed. Switzerland: Springer International Publishing, 3 ed 2015, cap 11, pp 567
- [10] Yoshihiro Baba, Vladimir A. Rakov, *electromagnetic computation methods for lightning surge protection studies*, 1ª ed. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 1 ed 2016, cap 3, pp 43-70
- [11] Vernon Cooray, *An Introduction to Lightning*, 1ª ed. Londres, UK: Springer, 1 ed 2015, cap 15, pp 253-279
- [12] Laurent Chemartin, Clarisse Delalandre, Philippe Lalande, Frédéric Lago, Bruno Peyrou, Bruno Cheron, Arnaud Chazottes, Paul-Quentin Elias “Direct Effects of Lightning on Aircraft Structure: Analysis of the Thermal, Electrical and Mechanical Constraints”, Journal aerospaceLab, vol. 5, pp. 1-15, 2012
- [13] Y. Kostogorova-Beller, “Physics of Interaction of Lightning Currents with Aluminum Sheets”, Journal of aircraft, vol. 49, No. 1, pp. 1-10, 2012