

RECOMENDACIONES PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN EL PATRIMONIO CONSTRUIDO

Vernieri, J. Z.¹ – **Traversa, L. P.**² – **Soibelzon, H. L.**³

¹ Facultad de Ingeniería - UNLP, Argentina – julieta_vernieri@yahoo.com

² Investigador CIC-LEMIT, Argentina – direccion@lemit.gov.ar

³ Facultad de Ingeniería - UNLP y UBA, Argentina – hsoibel@gmail.com

RESUMEN

Con el objeto de preservar los valores tangibles e intangibles del patrimonio cultural construido, se han elaborado numerosos y prestigiosos documentos internacionales, los cuales establecen el marco de una serie de principios teórico doctrinarios que delimitan y guían los diferentes tipos de intervenciones en el patrimonio.

Como consecuencia de los daños sufridos por el patrimonio construido, a causa de fenómenos naturales (algunos de ellos catastróficos), los especialistas han advertido la importancia de centrar los esfuerzos en planes estratégicos de prevención y manejo de riesgos.

En algunas regiones, como la zona geográfica a la que pertenece la ciudad de La Plata, las grandes catástrofes naturales (terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, inundaciones, huracanes) son de una probabilidad prácticamente insignificante. Eventualmente, el riesgo a impactos de rayos durante las tormentas eléctricas, constituye el más probable.

En este marco, el propósito del trabajo es advertir sobre la importancia de la prevención ante este tipo de riesgos mediante la evaluación y la instalación de sistemas de protección contra rayos en edificios patrimoniales, analizando algunos casos particulares de nuestra ciudad.

En el documento se describen los posibles efectos dañinos que las descargas atmosféricas pueden tener sobre el patrimonio construido, así como las medidas preventivas recomendables según la normativa internacional vigente y de aceptación a nivel mundial, elaborada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC: International Electrotechnical Commission), norma IEC 62305 del año 2006.

1 INTRODUCCIÓN

Desde la primera carta internacional del ICOMOS para la Conservación y Restauración de los Monumentos y Sitios, la Carta de Venecia de 1964 [1], hasta los últimos documentos internacionales, los principios de conservación y restauración han ido evolucionando, incluyendo hoy en día medidas de preservación, conservación, mantenimiento,

restauración, reconstrucción, adaptación, reparación, rehabilitación, etc. [2]. Sin embargo, recién en las últimas décadas se puso de manifiesto la importancia de la conservación a través de estrategias centradas en la prevención, más que en periódicas intervenciones curativas [3].

La elaboración de estrategias de prevención ofrece un enfoque más holístico ya que brinda una perspectiva desde la cual incluir todas las fuentes de deterioro, vinculadas en un solo proceso continuo, desde el desgaste diario del uso en un extremo, hasta las drásticas pérdidas ocasionadas por desastres naturales o conflictos, en el otro extremo.

Dentro de este amplio espectro de fuentes de deterioro se puede citar en particular los peligros naturales, siendo los mismos ocasionados por un evento geofísico, atmosférico o hidrológico [4], con un potencial para causar daño o pérdida. Usualmente incluye tanto eventos poco comunes, como eventos catastróficos. Entre los primeros podemos citar a las tormentas eléctricas, junto con las descargas atmosféricas que durante las mismas ocurren, motivo fundamental de análisis en nuestro presente trabajo.

A todo peligro se le puede asociar un riesgo, el cual resulta de una combinación de probabilidad de ocurrencia del peligro y la magnitud de las consecuencias de tal ocurrencia. La evaluación del riesgo de daño a un patrimonio edificado por impacto de rayos, es una tarea que compete a los especialistas.

El presente trabajo plantea la importancia de las medidas preventivas de protección contra descargas atmosféricas en el patrimonio edificado. Se presentan tres casos de edificios con valor histórico, artístico y religioso, tomados de la bibliografía internacional, en los cuales la protección no ha resultado apropiada. Se describe el sistema de protección instalado en la Catedral de la ciudad de la Plata y se realiza, dentro del proceso de evaluación del riesgo, el cálculo de la probabilidad de recibir un impacto de rayo para el edificio del Colegio Nacional "Rafael Hernández", de la ciudad de La Plata.

2 LA PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Las Descargas Atmosféricas

Las descargas atmosféricas son –de los fenómenos naturales– uno de los más espectaculares y comunes. Se estima que en nuestro planeta ocurren unas 2000 tormentas eléctricas por día, impactando al suelo unos 100 rayos cada segundo.

El rayo es una poderosa descarga eléctrica que se origina en un tipo particular de nube, el cumulus-nimbus, la cual, por diferentes procesos de electrificación forma una estructura tripolar de concentración de cargas eléctricas. Esto genera dentro de la nube grandes diferencias de potencial eléctrico, así como también respecto de otras nubes y entre la nube y la superficie de la tierra, pudiendo alcanzar típicamente varios cientos de millones de voltios. En suelos llanos, en la base de las nubes la carga generalmente es negativa.

Debajo de la nube el intenso campo eléctrico induce cargas eléctricas, generalmente positivas, en la superficie de la tierra y los elementos en ella existentes, como mástiles, cercos, árboles, edificios, personas, animales, pasto, etc.

Si bien el rayo aparece al ojo humano como una gran descarga luminosa, el proceso lleva varias etapas previas. Desde la nube se inicia un proceso de sucesivas descargas que describen una trayectoria irregular escalonada y muchas veces ramificada, la cual no es

visible al ojo. En esta trayectoria se establece un canal ionizado en el cual se van depositando cargas negativas. Al acercarse suficientemente al suelo y a los objetos en él presentes, se produce un proceso de enlace con alguno de dichos objetos, desde el cual ascenderá por el canal establecido una gran corriente eléctrica de cargas de sentido opuesto a la del canal. Esta corriente viaja a una velocidad del orden de 10 al 50 % de la velocidad de la luz y produce la intensa descarga luminosa así como el estrepitoso estruendo del trueno. Dado que el canal es zigzagueante y presenta ramificaciones, es que el rayo se presenta al ojo con la típica forma zig-zag irregular y ramificada.

Los niveles de corriente de los rayos pueden alcanzar hasta los 400.000 amperes, con un valor estadístico promedio de alrededor de 30.000 amperes.

Los daños provocados por caídas de rayos pueden incluir desde muertes, a daños materiales leves, daños considerables como incendios, explosiones, fallos en los sistemas de transmisión de electricidad, disturbios o daños en el equipamiento electrónico, etc.

Un impacto directo produce calentamiento por efecto de la circulación de corriente. Si la estructura en la que impacta el rayo es metálica muy probablemente soporte este calentamiento sin problemas, salvo ante rayos excepcionalmente intensos con los que es posible que parte del metal se funda. Si el elemento impactado es de los considerados semiconductores, tales como árboles, mampostería, concreto, ladrillos, madera, etc., es posible que no soporte los efectos térmicos y mecánicos. Por ejemplo, cuando un rayo impacta un árbol se produce violento secado consecuencia de la presión de vaporización de la humedad que contiene el árbol en su interior, haciendo que la corteza estalle. Algo similar ocurre con la humedad contenida en las edificaciones de madera, mampostería o concreto, sobre todo si en ellas existen pequeñas fisuras, la cual al vaporizarse estalla expulsando trozos de material de mampostería, ladrillos, etc.

Durante la caída y derivación de un rayo a tierra, también aparecen grandes diferencias de tensión entre las diversas partes del edificio afectado que pueden producir descargas en forma chispas, las cuales en un ambiente propicio podrán provocar un incendio o explosión. Las tensiones desarrolladas en el camino de bajada y en la puesta a tierra, tensiones denominadas de paso y de contacto, pueden resultar un riesgo para las personas que se hallaran en las proximidades.

2.2 Los Sistemas de Protección Contra Descargas Atmosféricas

No existe método alguno capaz de evitar la formación de descargas atmosféricas. El propósito de todo sistema de protección contra los rayos, será entonces, lograr una importante reducción de los daños controlando el paso de la corriente de las descargas eléctricas, y así prevenir lesiones a las personas y daños a la propiedad.

El desarrollo de los sistemas modernos de protección contra rayos comenzó con Benjamín Franklin en el siglo XVIII. Luego de verificar que las descargas atmosféricas se comportaban como descargas del tipo eléctricas, Franklin propuso hacia 1752 lo que luego se convertiría en un sistema convencional de protección contra rayos [5].

Un sistema de protección contra descargas atmosféricas, LPS según sus siglas en inglés (*Lightning Protection System*) estará compuesto de tres elementos fundamentales que forman una cadena en la que ningún eslabón funciona correctamente sin el otro:

- Sistema de captación (terminales aéreos o pararrayos)

- Sistema de conductores de bajada
- Sistema de terminación a tierra (puesta a tierra).

Además de estos tres elementos fundamentales, se requerirá de un sistema de equalización de potencial con el objeto de disminuir a niveles tolerables las diferencias de potencial generadas entre diferentes partes de la instalación protegida.

El sistema tiene por objeto proveer los medios suficientes para que la corriente preferentemente pueda entrar y/o salir de tierra a través de un camino de baja impedancia, derivando en forma segura la energía de una descarga eléctrica atmosférica hacia la tierra física.

2.3 Las Normativas

La protección contra rayos es tan compleja que va más allá de la simple instalación de un pararrayos o de un circuito de protección. Años de estudios y ensayos permitieron generar gran cantidad de normas y códigos especificando las características de los Sistemas de Protección contra Descargas Atmosféricas.

La institución técnico-científica de referencia a nivel internacional, es sin duda, la Comisión Internacional Electrotécnica, más conocida por sus siglas en inglés IEC (*International Electrotechnical Commission*). Su más reciente publicación es la norma serie IEC 62305-1 a 5 [6] del año 2006, aplicable a la protección contra las descargas atmosféricas de edificios, incluyendo sus instalaciones, su contenido y a las personas que en ellos se encuentren, así como a los servicios que se conectaran al edificio. Afortunadamente, se aplica sin límite de altura, contrariamente a lo que sucedía con su serie anterior, la IEC 61024, aplicable a edificios de hasta 60 m de altura. Este avance resulta de gran importancia, particularmente para los edificios de valor patrimonial, ya que una parte importante de los mismos resultan estructuras de gran altura, sean iglesias, torres, minaretes, pirámides, obeliscos, etc.

Actualmente en Argentina existen las normas de la Asociación Electrotécnica Argentina AEA 92305, [7], las cuales están basadas en la norma internacional serie IEC 62305 [6].

En la búsqueda de una mejora del desempeño de los sistemas de protección, es que se han investigado diversos métodos tendientes a aumentar la efectividad de los pararrayos tradicionales o también denominados convencionales. Por un lado se desarrollaron los dispositivos de cebado (o ESE según sus siglas en inglés "*Early Streamer Emission*") los cuales pretenden aumentar significativamente el área de captación de descargas con respecto al pararrayos convencional. La otra tecnología se refiere a los dispositivos disipativos (o DAS según sus siglas en inglés "*Dissipation Arrange System*") también llamados sistemas de transferencia de carga (CTS en inglés "*Charge Transfer System*") con los que se pretende impedir la formación del rayo sobre la estructura a proteger.

Sin embargo, luego de años de estudios y de ensayos, no hay evidencia experimental que sustente la hipótesis de mayor efectividad de estas tecnologías frente a los pararrayos convencionales. Sin embargo, existen ciertas normativas, la primera de ellas en Francia (norma NFC 17-102), que avalan el uso de estos dispositivos no convencionales.

3 PROTECCIÓN DE EDIFICIOS CON VALOR PATRIMONIAL

3.1 Antecedentes

Analizado el fenómeno del rayo, es razonable esperar que los puntos más vulnerables de una estructura al impacto de los rayos sean los más altos y/o sobresalientes. Por ello no es de extrañar, que los registros de daños acontecidos antes de la invención del pararrayos de Benjamín Franklin, indicaran como edificios más castigados a las iglesias, torres, campanarios, etc., ya que estos en general eran los edificios más sobresalientes en altura. Incluso antes de la invención del pararrayo, existían documentos que recomendaban a los individuos que, durante las tormentas buscaran refugio dentro de las casas o cualquier otro lugar cubierto, excepto en las iglesias y sus cercanías.

A pesar de ello, en aquella época aún persistía la práctica, iniciada durante la Edad Media, de repicar violentamente las campanas de la iglesia durante las tormentas, en un esfuerzo por espantar los espíritus malignos, y evitar el impacto del rayo.

Otra de las fatídicas costumbres, consistía en almacenar bajo las bóvedas de las iglesias grandes cantidades de pólvora. La combinación de una alta torre y los explosivos en ella contenidos resultó a menudo muy peligrosa. En el año 1769 un rayo cayó en la iglesia de San Nazario y Celso en Brescia (Italia), destruyendo una sexta parte del pueblo y llevándose la vida de más de 3.000 personas. La iglesia almacenaba toneladas de pólvora.

Cuando en 1752 Franklin inventó el pararrayos fue duramente atacado por querer torcer los designios divinos. Por años la Iglesia permaneció indiferente a sus recomendaciones. De ahí que tales trágicos acontecimientos recientemente citados, ocurrieran inclusive con posterioridad a las primeras recomendaciones publicadas por Franklin, en 1753, en el *Poor Richard's Almanac*. Demandó varios años y varias pérdidas para que la Iglesia finalmente aceptara la teoría de Franklin. [8]

En Italia, el Campanario de la Iglesia San Marcos en Venecia sufrió en diferentes oportunidades varios impactos de rayos que requirieron de reiteradas reparaciones, inclusive de su reconstrucción. Sin embargo el mismo no fue protegido sino hasta 1766 – catorce años después del descubrimiento de Franklin – habiendo sufrido dos impactos más de rayos desde dicho descubrimiento (en 1761 y en 1762).

En Austria, la iglesia de Rosenberg, en las montañas de Carintia, fue golpeada con tanta frecuencia y con pérdida de vidas, que los campesinos temían asistir a los servicios. Tres veces fue reconstruida la aguja, y recién en 1778 –veintiséis años después del descubrimiento de Franklin – las autoridades permitieron la colocación de una varilla de Franklin. Entonces los problemas cesaron.

En Inglaterra, el primer pararrayos colocado sobre una iglesia ocurrió en 1762, diez años después del descubrimiento de Franklin. La aguja de la iglesia de St. Bride en Londres fue muy dañada por un rayo en 1750, y en 1764 una tormenta causó tanto destrozo que la misma tuvo que ser prácticamente reconstruida. Aún por varios años más las autoridades se negaron a colocar un pararrayo. La catedral protestante de St. Paul, en Londres, no estuvo protegida hasta dieciséis años después del descubrimiento de Franklin. La gran torre de la iglesia protestante en Hamburgo recién fue protegida en 1769.

Así y todo, un siglo más tarde al descubrimiento de Franklin, una nueva catástrofe ocurría en una iglesia sin protección. En 1856, un rayo impactó en la iglesia de San Juan en la isla de Rodas, y la pólvora allí almacenada en las bóvedas explotó matando a 4000 personas.

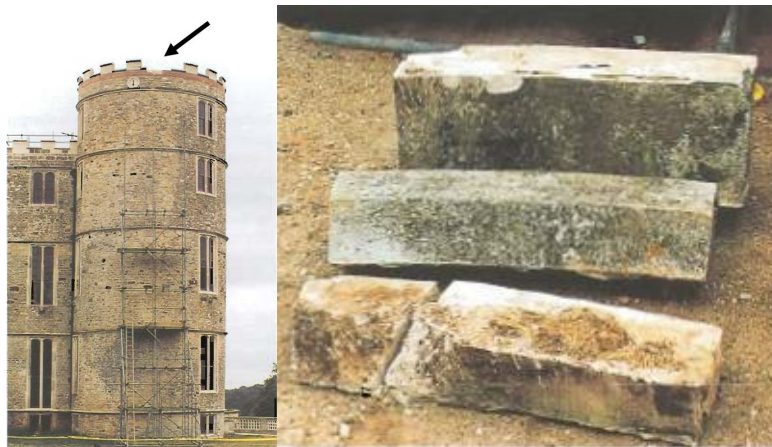
Hoy en día está ampliamente difundida y aceptada la teoría de la descarga eléctrica que explica el comportamiento del rayo. Sin embargo, aún se siguen registrando impactos en

todo tipo de edificios, inclusive aquellos con valor patrimonial, sea por la ausencia de sistema de protección o por lo inadecuado del mismo.

3.2 Casos de Falta de Protección o Protección Inadecuada

A continuación se brindan algunos ejemplos de impactos de rayos en edificios de valor artístico, histórico o religioso:

a) **Castillo Lulworth, Inglaterra:** Este edificio desprovisto de pararrayo alguno, construido a principios del siglo VII como pabellón de caza, recibió un impacto de rayo en su torre el 10 de julio de 1995. El mismo provocó el desprendimiento y caída de una parte del parapeto almenado de la torre, ver Fotografía 1 [9].



Fotografía 1. Daño estructural de la pared no protegida de la torre del Castillo de Lulworth, por impacto de un rayo. Piedras de la albardilla expulsadas del parapeto durante el impacto (fotografía: Keith Ranson, English Heritage [9])

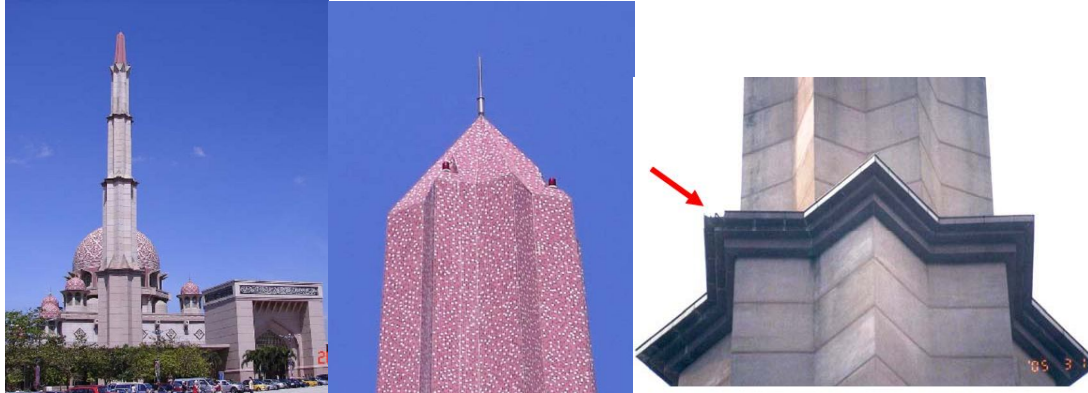
b) **Iglesia de Easton Maudit, Northamptonshire, Inglaterra:** Este edificio estaba protegido de acuerdo a la normativa británica (British Standard 6651:1992), quedando definida la zona de protección en base al ángulo de protección, método que se considera sólo aplicable a estructuras de altura moderada.

En lo alto de la aguja estaba instalado un pararrayos junto con su conexión de bajada, en correctas condiciones, sin embargo sufrió un impacto lateral, que produjo una expulsión de parte de la piedra por debajo de la aguja-terminal, tal como puede observarse en la imagen de la derecha de la Fotografía 2. El impacto lateral descargó la corriente a través del mortero hacia una varilla metálica interior que sujetaba en el extremo superior una veleta. Aparentemente la corriente viajó a través de la junta algo degradada y húmeda, generando muy altas presiones por la rápida vaporización de la humedad contenida, lo cual provocó la fuerza mecánica que expulsó violentamente parte del material [10].



Fotografía 2. Iglesia de Easton Maudit en Northamptonshire, Inglaterra. Fotografía de la derecha: Daño causado por un impacto lateral de rayo.

c) **Minarete de la mezquita de Putrajaya, Kuala Lumpur, Malasia:** Este edificio, fue completado en 1998 alcanzando una altura de 116 m, ver Fotografía 3. Fue provisto en su extremo superior con un terminal de captación del tipo no convencional, en este caso un pararrayos de cebado, (Early Streamer Emission), ver imagen central de la Fotografía 3. La regulación aplicada en este caso fue la controvertida norma francesa NFC 17-102.



Fotografía 3. Mezquita y minarete de Putrajaya, Kuala Lumpur, Malasia. Pararrayos ESE en la cima del minarete. Daño causado por un impacto lateral [11].

En el año 2005 el minarete sufrió un impacto lateral, unos 30 m por debajo de la cima, ver imagen de la derecha de la Fotografía 3. Esto muestra, una vez más, cómo las reclamadas ventajas de este tipo de protección no convencional, no resultan tales [11].

3.3 El Sistema de Protección de la Catedral de la Ciudad de La Plata.

La Catedral de la ciudad de La Plata constituye hoy un monumento histórico así como una manifestación de cultura y fe religiosa [12]. Su construcción se inició en 1884, según el

proyecto del ingeniero Pedro Benoit, quien propuso un estilo neogótico, inspirándose en las catedrales de Colonia en Alemania y de Amiens en Francia.

El diseño de Benoit consistió en una planta cruciforme, con deambulatorio, cinco naves de una longitud de más de 100 m, arbotantes, así como una serie de elaborados vitrales, múltiples torres, pináculos, agujas, terminales y gabletes. Si bien el proyecto original preveía el revestimiento del edificio el mismo no fue realizado, quedando a la vista los ladrillos. Aún no completada la obra la misma fue inaugurada en 1932, durante el 50 aniversario de la ciudad. Hacia la década del 40 la obra quedó interrumpida por falta de fondos.

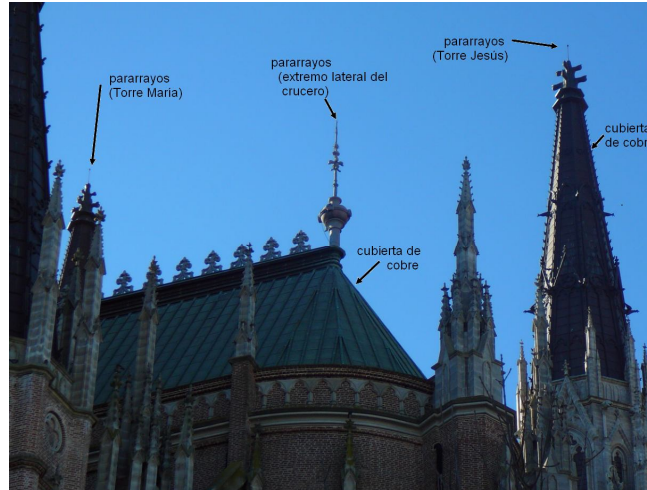
En 1992 se creó la Fundación Catedral, con el fin de cuidar, conservar, restaurar y finalizar la construcción de la Catedral de la ciudad de La Plata. En 1995 se realizaron las primeras obras de restauración, junto con la dirección de Arquitectura de Obras Públicas. Esta iniciativa dio origen a un proyecto mucho más ambicioso, el de completar la obra de Benoit. Es así que un año más tarde, el gobierno de la Provincia creó una Unidad Ejecutora para tal propósito.

Consultada la población local, se decidió mantener el ladrillo a la vista, contrariamente al proyecto original de Benoit y agregarle dos torres, con pináculos y terminales, los cuales requirieron un refuerzo de las fundaciones a los efectos de soportar el peso adicional. Hoy en día sus torres, de algo más de 100 metros de altura, representan el punto más alto de la ciudad.

Dentro de las obras llevadas a cabo, se realizó la instalación de un sistema de protección contra descargas atmosféricas. La descripción del sistema instalado fue presentado en el IX International Symposium on Lightning Protection del 2007 [13]. Los autores de dicho documento, fueron los responsables del cálculo de la ubicación de los pararrayos, habiendo sido los pararrayos preseleccionados por el comitente. El primer inconveniente con el que se encontraron los responsables del cálculo fue que el edificio en cuestión quedaba fuera del alcance de la normativa existente. A la fecha, año 1999, la normativa nacional vigente era la IRAM 2184, basada en la norma internacional IEC 61024, sin embargo la misma no incluía en su alcance edificios de altura mayores a 60 m, tal es el caso de la catedral. Los autores decidieron realizar el diseño y cálculo del sistema de protección aplicando un método alternativo.

Un segundo e importante inconveniente presentado fue el tipo de pararrayos preseleccionado por el comitente, para adicionar a los ya existentes, ya que los mismos resultaron ser del tipo no-convencionales, con dispositivo de cebado, (o ESE). Tal como fuera expuesto en el presente trabajo este tipo de pararrayos no cuenta con el aval de la comunidad científica mundial. Ante esta complicación los responsables del cálculo creyeron conveniente considerar a los pararrayos como convencionales, es decir, suponiendo su alcance, o radio de acción, equivalente al de uno convencional y no con un alcance "aumentado" tal como lo declaran los fabricantes y las controversiales normativas que los avalan.

El sistema propuesto resultó una combinación de elementos naturales tales como cubiertas de cobre, sistema de drenaje pluvial, etc. y elementos adicionales tales como pararrayos, conductores de bajada, jabalinas, etc.



Fotografía 4. Catedral de la ciudad de La Plata. Pararrayos.

Se colocaron un total de seis pararrayos, los dos nuevos, tipo ESE, en el extremo superior de las agujas de las dos torres del frente (Torre María del lado de la Av. 51 y Torre Jesús del lado de la Av. 53). Los preexistentes uno en cada extremo del techo del crucero, un pararrayos sobre la torre central que está arriba del crucero y un sexto pararrayos en el extremo posterior del techo de la nave central.

En la Fotografía 4 se pueden observar los dos pararrayos de las torres frontales (vistos desde atrás) y uno de los pararrayos del crucero, extremo del lado de Av. 53.

A su vez las agujas poseen una cubierta de cobre de 1,2 mm de espesor en el tramo de que va de los 80 m (sobre el terreno) hasta los 108 m, lo cual las protegería de impactos laterales, factibles de ocurrir en estructuras de tanta altura.

Dado que el techo de la nave principal, así como del crucero, también poseen una cubierta de cobre de 1,2 mm de espesor (ver Fotografía 4), se consideró el mismo como elemento captor "natural" a pesar de no satisfacer los requerimientos de la norma vigente entonces (5 mm). De esta manera se complementó el sistema de captación de los pararrayos con la cubierta de cobre, elemento captor natural.

Se verificó entonces la protección por medio del método de la esfera rodante considerando un radio de la esfera relacionado con la intensidad de la corriente del rayo, tal como lo expresa la siguiente ecuación [13]:

$$r_s = 9,4 I_0^{0,66} \quad (1)$$

Basándose en este método se detectó la posibilidad de impactos laterales debido a la gran altura de las torres. Por lo tanto se pensó en adicionar conductores como elementos captadores dispuestos cada unos 20 m de altura de manera horizontal y envolviendo las torres. Sin embargo dado que se observó la existencia de un sistema de drenaje pluvial exterior el cual, según mediciones, presentaba continuidad galvánica, se decidió considerar a estos elementos como conductores de bajada así como elementos captadores laterales naturales, sin necesidad de adicionar otros conductores para cumplir la función de

elementos captadores. Este mismo sistema de drenaje pluvial estaría naturalmente puesto a tierra.

Desde los pararrayos instalados se tendieron conductores de bajada que conectan directamente los pararrayos con un sistema de puesta a tierra conformado por jabalinas. Para reducir los riesgos por tensiones de paso y de contacto, estos conductores de bajada fueron rodeados de un cerco para evitar la aproximación de cualquier transeúnte.

3.4 Metodología de Evaluación de Riesgo en un Caso de Aplicación

Previo al diseño de un sistema de protección contra las descargas atmosféricas se requiere de un análisis de evaluación del riesgo, de manera de establecer la necesidad o no de proteger una dada estructura. Sin embargo frente a un edificio de valor patrimonial, la decisión de instalar un sistema muchas veces es tomada sin tener en cuenta esta evaluación previa, dado que se considera que toda medida tendiente a reducir el riesgo es primordial.

De todas formas un estudio de evaluación del riesgo permitirá conocer mejor y cuantificar los diferentes tipos de riesgos a los que está sometida la estructura, de manera tal de seleccionar el nivel de protección que resulte apropiado así como las medidas adicionales a aplicar.

A continuación se presenta un caso de aplicación de la metodología de evaluación de riesgo a un edificio patrimonial de la ciudad de La Plata, el Colegio Nacional "Rafael Hernández", perteneciente a la Universidad Nacional de La Plata.

El edificio principal del colegio fue construido a comienzos del siglo XX, colocándose la piedra fundacional el 2 de setiembre de 1905. El mismo fue erigido dentro de un área de 18 hectáreas anteriormente perteneciente al Parque Iraola, completando el conjunto otras instalaciones como el internado, un inmenso gimnasio cubierto, semejante a un templo griego, una pileta de natación, y canchas para practicar todo tipo de deportes. Estéticamente, el conjunto fue diseñado bajo los lineamientos del eclecticismo imperante a fines del siglo XIX, [14] [15]. En el año 1992, mediante la ley n°11371, el edificio fue declarado patrimonio municipal y provincial por su valor urbano y arquitectónico.

La normativa internacional IEC 62305-2 [6] y su respectiva normativa nacional asociada, la AEA 92305- [7], brindan una metodología de evaluación de riesgo. El método provee un procedimiento para la evaluación del riesgo total en comparación con el límite superior del riesgo tolerable. A su vez permite la selección de adecuadas medidas de protección a ser adoptadas para reducir el riesgo por debajo del límite tolerable. El límite tolerable deberá contemplar, entre otros factores, la función y/o contenido del edificio, previendo la norma considerar dentro de una categoría especial, aquellos edificios que poseen un valor cultural irremplazable.

La norma define cuatro tipos de riesgos: R_1 riesgo de pérdida de vidas humanas, R_2 riesgo de pérdida de servicios públicos, R_3 riesgo de pérdida de herencia cultural y R_4 riesgo de pérdida de valor económico.

Los pasos a seguir en cualquier evaluación de riesgo son:

- a) identificación de la estructura y sus características

- b) identificación de los tipos de pérdida y su correspondiente riesgo asociado (R_1 a R_4)
- c) evaluación de cada tipo de riesgo (R_1 a R_4)
- d) evaluación de la necesidad de protección por comparación de los riesgos con el valor tolerable para cada uno.

3.4.1 Identificación de la Estructura y sus Características

Al analizar el riesgo se debe tener en cuenta la estructura en sí misma; las instalaciones en la estructura; los contenidos de la estructura; las personas presentes en la estructura o paradas en las zonas hasta 3 m desde afuera de la estructura; y el medioambiente afectado por el daño a la estructura.

Con respecto a la estructura en sí misma resulta fundamental conocer sus dimensiones de manera de establecer su volumen y la superficie envolvente que lo delimita, ya que de ella dependerá el área equivalente de exposición al impacto de rayos.

Otras características que interesan de la estructura son: el material del cual está construida (madera, hormigón armado, concreto, mampostería, etc.); el tipo de material del solado tanto en el interior como en el exterior del edificio; la resistividad propia del terreno en el cual se implanta la estructura; su ubicación en relación a los elementos que la rodean (si hay elementos más altos, o de altura similar, o si se encuentra en la cima de una colina), si se encuentra en área urbana, suburbana o rural, etc.

En lo que respecta a las instalaciones se debe tener en cuenta si tiene o no sistema de protección contra descargas atmosféricas instalado y cuáles son sus características. Asimismo resulta importante conocer la forma de conexión y las características de los sistemas eléctricos de alimentación, así como del sistema de telecomunicaciones, ya que son vías de acceso probables para la corriente del rayo cuando impacta en las cercanías, inclusive en los cables mismos, y no directamente sobre el edificio. También influyen las medidas de equipotencialización, si existieran, de los diferentes sistemas metálicos, es decir sistemas de cañerías, armazones metálicas del hormigón, líneas de alimentación eléctrica, cables de comunicaciones sean de telefonía, internet, TV, etc.

En lo que respecta a los contenidos de la estructura interesa conocer su grado de inflamabilidad y las medidas contra incendio que el edificio posea.

En lo que respecta a las personas en la estructura o sus alrededores, el número está relacionado con el uso al que se lo destina, ya que de él dependerá la cantidad de personas potencialmente en peligro en el edificio y en una franja de 3 m por alrededor del mismo.

En cuanto al medioambiente resulta importante determinar si los efectos del daño a la estructura podrán propagarse afectando al ambiente, tal como sucede por ejemplo con una planta nuclear, o de un depósito de armas o de otros elementos explosivos, o de compuestos químicos, etc.

3.4.2 Identificación de los Tipos de Pérdida y su Correspondiente Riesgo Asociado

Es responsabilidad de las autoridades encargadas de la salvaguarda del patrimonio, así como del director del plan de restauración, determinar la importancia relativa de cada uno de los riesgos. Para el caso bajo análisis se consideran relevantes el riesgo de pérdida de vidas humanas R_1 , así como el riesgo de pérdida de herencia cultural R_3 , mientras que el riesgo de pérdida de servicios públicos R_2 , así como el riesgo de pérdida de valor económico R_4 , pueden ser desestimados.

3.4.3 Evaluación de Cada Tipo de Riesgo

El riesgo de pérdida de vidas humanas R_1 , se calcula a partir de la suma de las siguientes componentes de riesgo [7]:

$$R_1 = R_A + R_B + R_C^{1)} + R_M^{1)} + R_U + R_V + R_W^{1)} + R_Z^{1)} \quad (2)$$

Donde:

R_A : componente de riesgo de lesiones a seres vivos causadas por tensiones de contacto y de paso, debido a rayos que impactan en la estructura.

R_B : componente relacionada con el daño físico causado por chispas peligrosas en el interior de la estructura provocando un incendio o una explosión, debido a rayos que impactan en la estructura.

R_C : componente relacionada a fallas del sistema interno causadas por el pulso electromagnético del rayo, debido a rayos que impactan en la estructura.

R_M : componente relacionada a fallas de los sistemas internos causadas por el pulso electromagnético del rayo, debido a rayos que impactan en las cercanías de la estructura.

R_U : componente relacionada con el daño causado a los seres vivos por tensión de contacto dentro de la estructura debido a la corriente del rayo que pueda transmitirse a través de los servicios entrantes, es decir líneas de alimentación eléctrica, líneas de telecomunicaciones u otras..

R_V : componente relacionada con los perjuicios debidos a los daños físicos (incendio o explosión provocados por chispas peligrosas entre la instalación exterior de la línea y piezas metálicas en general, en el punto de entrada de la línea en la estructura), debido a la corriente del rayo que pueda transmitirse a través de los servicios entrantes.

R_W : componente relacionada a fallas en el sistema interno causadas por sobretensiones inducidas en las líneas entrantes y transmitidas a la estructura, por rayos que impactan en las líneas.

R_Z : componente relacionada a fallas en el sistema interno causadas por sobretensiones inducidas en las líneas entrantes y transmitidas a la estructura, por rayos que impactan en las cercanías de las líneas.

¹⁾ Estas componentes resultan nulas en el caso bajo análisis dado que la estructura no presenta riesgo de explosión, ni hay vidas humanas dependientes de los sistemas eléctricos o electrónicos internos, como sería el caso de los hospitales.

El riesgo de pérdida de herencia cultural R_3 , se calcula a partir de la suma de las siguientes componentes de riesgo [7]:

$$R_3 = R_B + R_V \quad (3)$$

Donde:

R_B y R_V si bien se definen de igual manera que en la ecuación (2), no les corresponde el mismo valor, dado que en el cálculo de estas últimas no intervienen

factores relacionados con la pérdida de vidas humanas, como podrían ser los efectos de pánico.

Una descripción del cálculo de cada una de dichas componentes podrá obtenerse en la normativa [7].

A continuación, se calcula el número promedio anual de eventos peligrosos debidos a rayos en la estructura, parámetro que interviene en el cálculo de las componentes R_A y R_B , es decir, en la componente de riesgo de lesiones a seres vivos causadas por tensiones de contacto y de paso y en la componente relacionada con el daño físico causado por chispas peligrosas en el interior de la estructura provocando un incendio o una explosión.

3.4.4 Cálculo del Número Promedio Anual de Eventos Peligrosos Debidos a Rayos en la Estructura

El cálculo del número promedio anual de eventos peligrosos debidos a rayos en la estructura, parámetro denominado N_D , requiere del conocimiento de la actividad atmosférica local por un lado y, por el otro, de las características de la estructura a proteger.

En lo que respecta a la actividad atmosférica en nuestro país no se cuentan con datos precisos por no disponer de estudios que registren directamente las descargas atmosféricas a tierra (N_g), aunque sí es posible obtener una medida indirecta de las mismas a través de la cantidad anual de días con tormentas eléctricas o relámpagos (parámetro T_d).

El Servicio Meteorológico Nacional – Fuerza Aérea Argentina – cuenta con una red de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio nacional, en las cuales se registra la cantidad anual de días con tormentas eléctricas o relámpagos. Este parámetro es llamado nivel cerámico (T_d).

A partir de un análisis estadístico de los valores suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional correspondientes al intervalo que va del año 1991 al 2005 la Asociación Electrotécnica Argentina elaboró un mapa del país con las curvas de nivel isocerámico [7]. Según la normativa de aplicación [7] es posible utilizar la siguiente aproximación para estimar la densidad de rayos a tierra N_g , a partir del nivel cerámico T_d .

$$N_g \approx 0,1 \times T_d \quad (4)$$

Donde:

N_g es la densidad de rayos a tierra o número de las descargas de rayos por km^2 por año.

T_d son los días de tormenta por año.

Según el mapa de curvas de nivel isocerámico, a la región de la ciudad de La Plata le corresponde un nivel T_d de aproximadamente 40 días de tormenta al año. Aplicando la ecuación (4) el valor aproximado de la densidad de descargas a tierra, N_g , correspondiente es $4 \text{ rayos}/\text{km}^2 \text{ año}$.

En lo que respecta al cálculo del área equivalente de exposición al impacto de rayos, el edificio del Colegio Nacional es considerado como una estructura de forma compleja, por lo que se requiere la aplicación de un método gráfico, tal como lo indica la normativa [7].

En la Figura 1 se presenta una planta del edificio, en la Figura 2 una vista de la fachada principal, en la Figura 3 una vista de la fachada posterior y en la Figura 4 una vista lateral. En estas figuras se señalan las dimensiones principales.

Se identifican en la estructura siete diferentes alturas sobresalientes: $H_1 = 27,40$ m, $H_2 = 22,10$ m, $H_3 = 34,20$ m, $H_4 = 20,90$ m, $H_5 = 10,58$ m, $H_6 = 7,80$ m y $H_7 = 6,62$ m, (ver Figuras 1 a 4). En la Fotografía 5 se puede observar el mástil de la bandera en la parte central de la fachada principal (altura H_3), así como se aprecia el parapeto perimetral del edificio con sus diferentes alturas (H_1 , H_2).

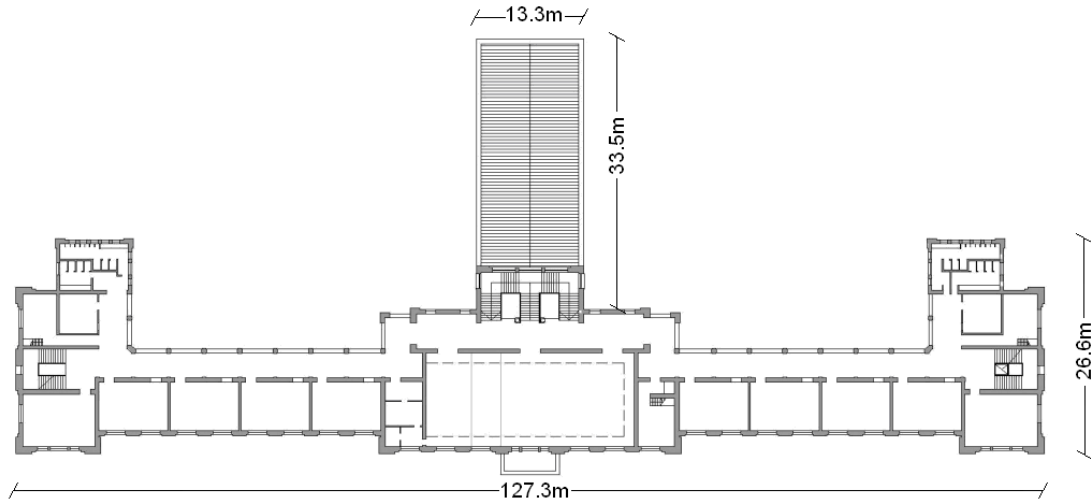


Figura 1. Plano de planta del edificio del Colegio Nacional.

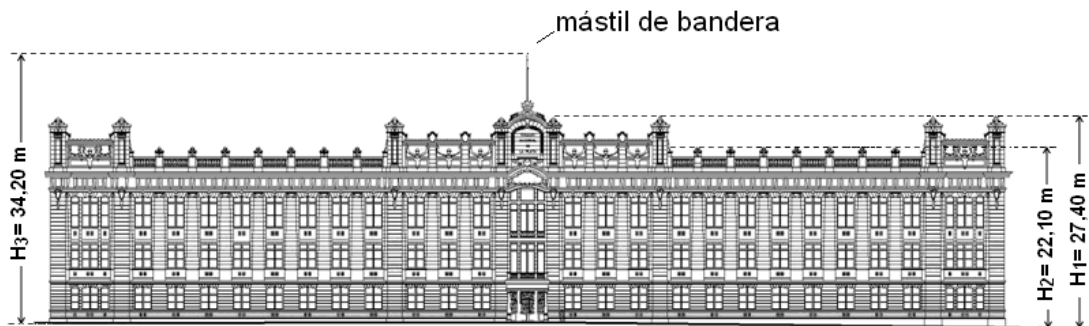


Figura 2. Vista de la fachada principal del edificio del Colegio Nacional.

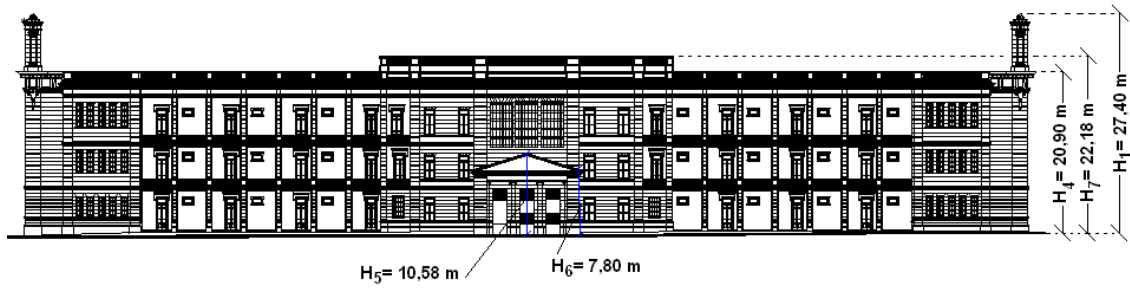


Figura 3. Vista de la fachada posterior del edificio del Colegio Nacional.

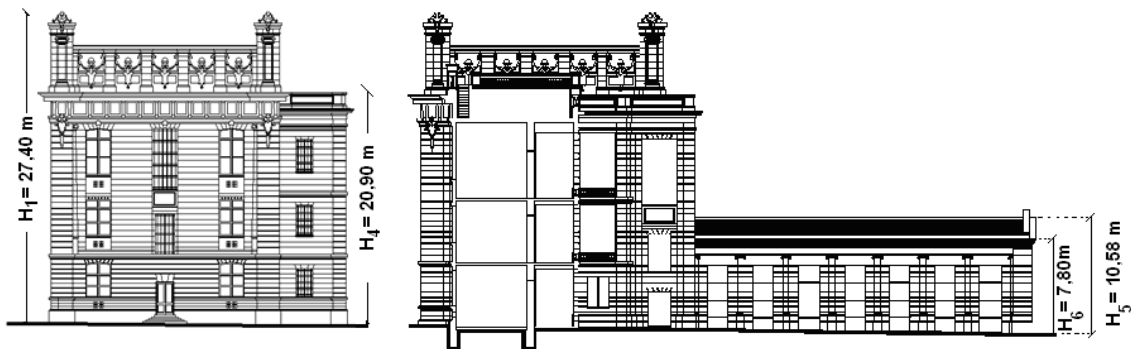


Figura 4. Vista lateral del edificio del Colegio Nacional.



Fotografía 5. Fachada principal del Colegio Nacional [14].

En la Figura 5 se indica sobre un plano de planta la forma en que se distribuyen estas siete diferentes alturas, algunas de las cuales se repiten de a tramos a lo largo del perímetro. Para cada una de las diferentes alturas sobresalientes se calculan sendas áreas de impacto, definidas según la norma por una proyección del triple de su altura [7].

Proyectando un área para cada una de las alturas identificadas se obtiene un conjunto superpuesto de áreas, de manera tal que el área equivalente resultante queda determinada sólo por dos de las alturas, ya que sus correspondientes áreas solapan a las restantes. Estas dos alturas son la altura H_3 correspondiente al mástil de la bandera que se encuentra en el centro de la fachada principal, el cual resulta la máxima altura del conjunto con sus aproximadamente 34,20 m sobre el nivel del suelo, y la altura H_1 de 27,40 m de las torrecillas del parapeto en los extremos de las alas del edificio. En la Figura 6 se indica el área total equivalente. Según los cálculos el área equivalente de exposición, A_d , resulta ser de 49626,2 m².

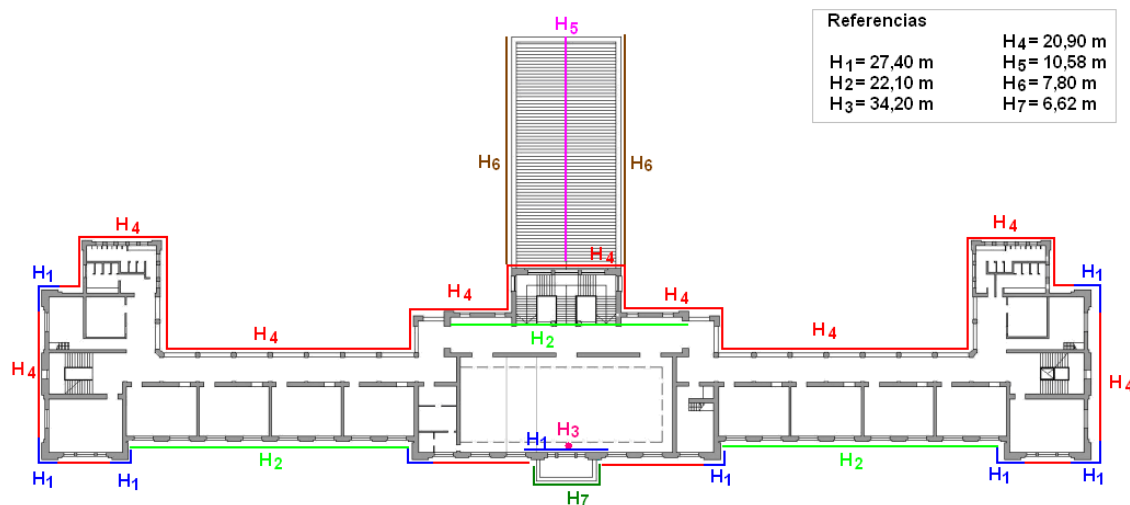


Figura 5. Vista en planta del edificio del Colegio Nacional. Alturas sobresalientes del techo y su perímetro.

Una vez obtenida el área equivalente de exposición, A_d , es posible calcular el número promedio anual de eventos peligrosos debidos a rayos en la estructura, parámetro denominado N_D , utilizando la siguiente expresión obtenida de la norma [7]:

$$N_D = N_g \cdot A_d \cdot C_d \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

Donde

N_D es el número de eventos peligrosos para una estructura, al año.

N_g es la densidad de rayos a tierra (número de rayos a tierra / km² año);

A_d es el área equivalente de la estructura en m²;

C_d es el factor de ubicación de la estructura, el cual tiene en cuenta si la estructura está rodeada de otros objetos y si éstos son más altos o no, tales como árboles, o si está ubicado en la cima de una colina por ejemplo.

Considerando que el edificio está rodeado por árboles de igual altura o menor (factor $C_d = 0,5$), aplicando la ecuación (5) se obtiene un valor de $N_D = 0,09925$ eventos peligrosos al año debidos a rayos que impactan en la estructura, considerada ésta sin sistema de protección contra descargas atmosféricas.

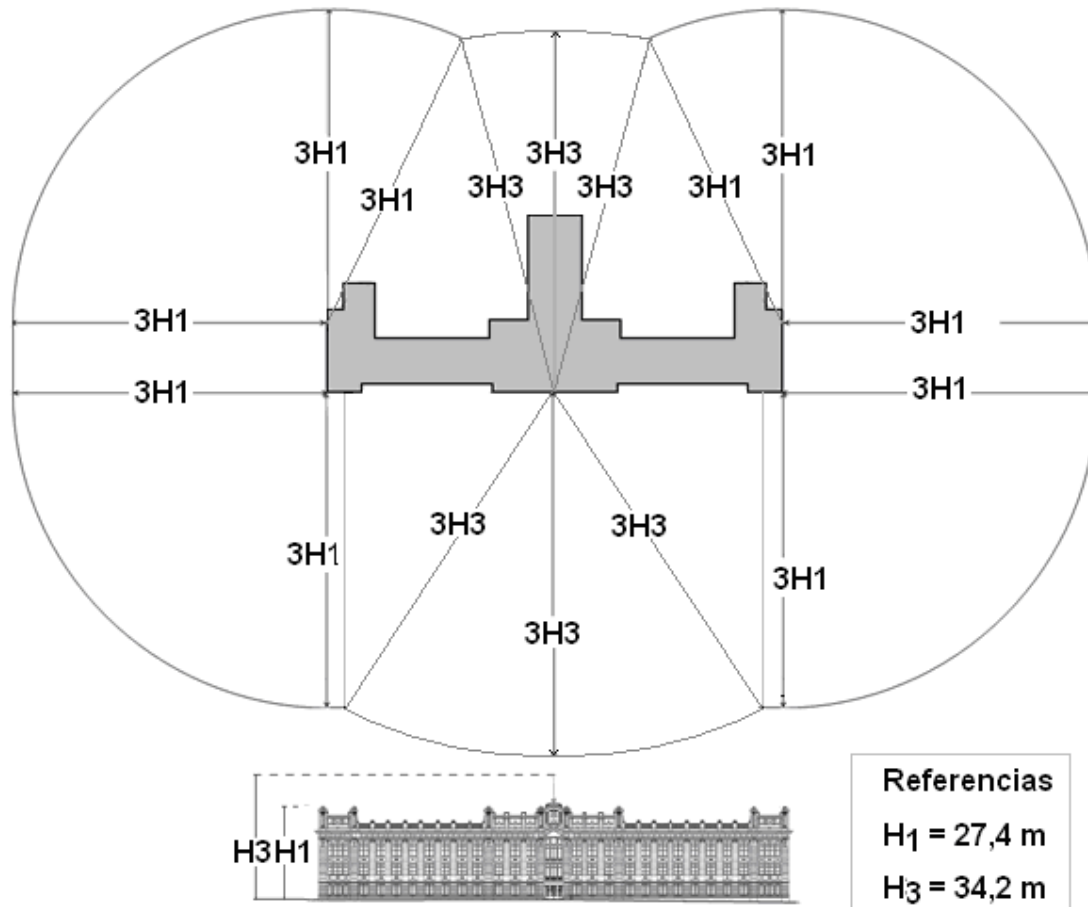


Figura 6. Área equivalente de exposición

Del cálculo realizado para el edificio del Colegio Nacional, surge que teniendo en cuenta la actividad atmosférica de la zona, la probabilidad de ocurrencia de impactos directos de rayo en la estructura resulta de aproximadamente uno cada diez años, siendo los puntos de impacto más probables, el mástil de la bandera y las torrecillas del parapeto.

3.4.5 Evaluación de la Necesidad de Protección

Una vez calculados cada uno de los riesgos R_1 , R_2 , R_3 , y R_4 , los mismos deben ser comparados con el riesgo tolerable R_T correspondiente, siendo responsabilidad de la autoridad de aplicación con competencia en el tema establecer estos valores tolerables. Las normas indican valores típicos, tales como los volcados en la Tabla 1 correspondientes a la norma internacional IEC 62305-2 [6] y la norma británica BS EN 62305-2 [15].

Tabla 1 – Valores típicos de riesgo tolerable, en número de pérdidas anuales.

Types of loss	IEC 62305-2 ($R_T (y^{-1})$)	BS EN 62305-2 ($R_T (y^{-1})$)
Loss of human life of permanent injuries	10^{-5}	10^{-5}
Loss of service to the public	10^{-3}	10^{-4}
Loss of cultural heritage	10^{-3}	10^{-4}

De la comparación entre el valor calculado (R_i) y el valor tolerable (R_T) surge que si: $R_i \leq R_T$ la protección contra el rayo no es necesaria, pero si $R_i > R_T$, deben ser adoptadas medidas de protección para reducir los riesgos a los cuales el objeto está sujeto. Las medidas de protección a adoptar dependen del nivel de protección seleccionado y las mismas son especificadas en la normativa [7].

4 CONCLUSIONES

Del presente trabajo surge la importancia de las medidas preventivas contra los efectos perjudiciales de las descargas atmosféricas tanto para el patrimonio que significan ciertas edificaciones así como para los elementos de valor en su interior y las personas que en ella transitan.

Dada la importancia del abordaje multidisciplinario de cualquier intervención en un patrimonio construido, resulta imprescindible que tanto el diseñador como el instalador de un sistema de protección contra descargas atmosféricas trabajen en cooperación con el equipo de científicos y técnicos, bajo un plan de restauración integral.

La protección contra las descargas atmosféricas del patrimonio construido constituye una técnica de prevención de riesgos que aún no ha recibido la atención que merece. Muchos edificios no poseen protección alguna, y cuando sí la tienen no resulta apropiada o emplean tecnología "no convencional" no avalada por la comunidad científica mundial.

Resulta esencial que las instituciones responsables de la salvaguarda del patrimonio consulten a los expertos en la materia, dado que muchas veces el punto de vista de muchos de los fabricantes no siempre está en todo de acuerdo con las bases científicas.

Una correcta protección comienza con un análisis de evaluación de riesgo, producto de la cual se optará por el nivel de protección apropiado. El sistema de protección a instalar, por lo tanto, deberá seguir las especificaciones de la norma de referencia mundial, que es la norma internacional serie IEC 62305, contando en nuestro país con la correspondiente norma nacional de la Asociación Electrotécnica Argentina, serie AEA 92305.

5 AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Construcciones y Mantenimiento de la Universidad Nacional de La Plata por facilitarnos los planos del Colegio Nacional.

A las Universidades Nacionales de La Plata y Buenos Aires por aceptar parte de las tareas de dos de los coautores dentro de sus planes de investigación.

6 REFERENCIAS

- [1] ICOMOS. "CARTA INTERNACIONAL SOBRE LA CONSERVACIÓN Y LA RESTAURACIÓN DE MONUMENTOS Y SITIOS". II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos. Venecia, 1964.
- [2] ICOMOS AUSTRALIA. "CARTA DE BURRA 1999". Carta del Comité Nacional Australiano del ICOMOS para Sitios de Significación Cultural.
http://www.international.icomos.org/burra1999_spa.pdf
- [3] STOVEL H.. "Risk Preparedness: A management manual for World Cultural Heritage". ICCROM, Rome, 1998.
- [4] TABOROFF, J. "Natural Disasters and Urban Cultural Heritage: A Reassessment, Building Safer Cities: The Future of Disaster Risk", World Bank Good Practice Notes, Washington DC, July 2008.
- [5] KRIDER E.P. BENJAMIN FRANKLIN AND THE FIRST LIGHTNING CONDUCTORS. *Proceedings of the International Commission on History of Meteorology 1.1* , 2004.
- [6] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION IEC 62305: "PROTECTION AGAINST LIGHTNING", Part 1 "GENERAL PRINCIPLES", Part 2 "RISK MANAGEMENT", Part 3 "PHYSICAL DAMAGE TO STRUCTURES AND LIFE HAZARD". First edition, 2006
- [7] ASOCIACIÓN ELECTROTÉCNICA ARGENTINA. AEA 92305: PROTECCIÓN CONTRA LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS - Parte 1: PRINCIPIOS GENERALES; Parte 2: EVALUACIÓN DEL RIESGO. Edición 2007.
- [8] HORSTMAYER S. L. AN OUTLINE OF THE HISTORY OF METEOROLOGY, Cátedra METEOROLOGY, The College of Mt. Saint Joseph, 2005,
http://www.shorstmeyer.com/msj/geo165/met_hist.pdf.
- [9] ECCLESIASTICAL INSURANCE GROUP & ENGLISH HERITAGE. LIGHTNING PROTECTION FOR CHURCHES. A GUIDE TO DESIGN AND INSTALLATION. 2000.
<http://www.english-heritage.org.uk/upload/pdf/Lightning-Protection-for-Churches.pdf>
- [10] DONLON T. LIGHTNING PROTECTION FOR HISTORIC BUILDINGS, *The Building Conservation Directory*, 1997.
<http://www.buildingconservation.com/articles/lightning/lightn.htm>
- [11] HARTONO Z. A., ROBIAH I. CONVENTIONAL AND UNCONVENTIONAL LIGHTNING AIR TERMINALS: AN UPDATE. 2007.
http://www.lightningsafety.com/nlsi_lhm/ACEM_Journal_Q1_2007.pdf.
- [12] Sitio web de la Fundación Catedral. <http://www.catedraldelaplata.com>.
- [13] SOIBELZON H. L., LIGHTNING PROTECTION FOR LA PLATA CITY CATHEDRAL, *Proceedings IX International Symposium on Lightning Protection (IX SIPDA)*, Foz do Iguaçu, Brasil, November 2007.
- [14] Sitio web del Colegio Nacional "Rafael Hernández"- UNLP:
<http://www.nacio.unlp.edu.ar>
- [15] PAPIER A., "La Restauración y Puesta en Valor del Colegio Nacional, U.N.L.P." VII Jornada Técnica de Restauración y Conservación del Patrimonio, La Plata, Argentina, Setiembre, 2008.
- [16] BRITISH STANDARD INSTITUTION. BS EN 62305-2: Protection against lightning. Risk Management. Sep. 2006.